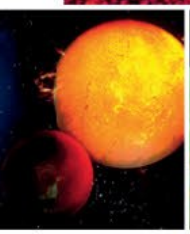
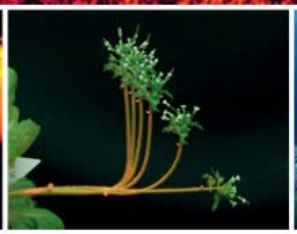
HORS-SÉRIE
SCIENCES ET AVENIR

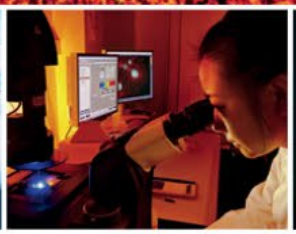
AVEC Marc Peschanski (Inserm), Michel Spiro (Cern), Pierre-Henri Gouyon (Muséum), Pascal Depaepe (Inrap), Viktor Mayer-Schönberger (Oxford)...

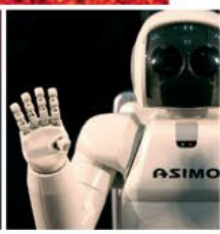
EDITION 2014

CE QU'IL FAUT SAVOIR

L'ESSENTIEL DE LA SCIENCE





Physique • Astronomie • Mathématiques • Robotique
Archéologie • Médecine • High-tech...

N°176 OCTOBRE / NOVEMBRE 2013 - BELGIQUE 5 € / LUXEMBOURG 5 € / AUTRICHE 5 € / ITALIE 5 € / ALLEMAGNE 7,50 € / PORTUGAL (CONT) 5,30 € / GRECE 5 € / SUISSE 7,90 FS / ANTILLES-RÉUNION 5 € / ESPAGNE 5 € / MAROC 50 D / TUNISIE 6,2 DTU / CANADA 7,50 $ CAN / USA NY 7,50 $ US / TOM (AVION) 1200 CFP / AFRIQUE 3000 CFA

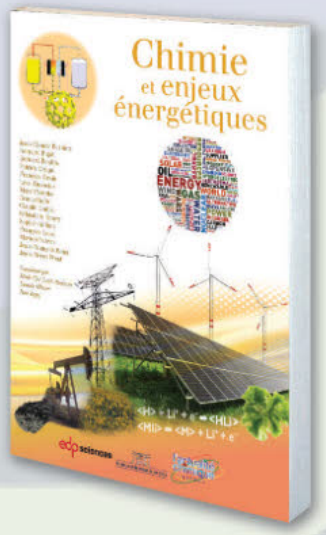
M 02597 - 176H - F: 4,90 € - RD

© NASA / ESA HUBBLE SPACE TELESCOPE - SPL / COSMOS - EADS - PHANIE - LATENIUM, NEUCHATEL - REUTERS

C'est la rentrée !!

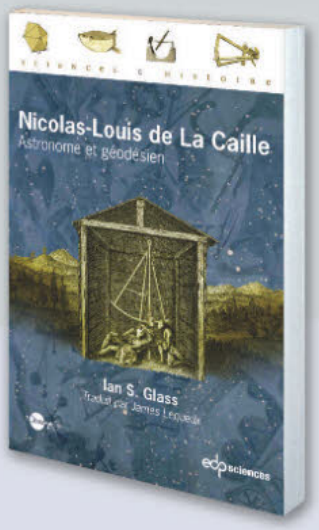
Profitez-en pour découvrir nos nouveautés

L'objectif de ce livre est de présenter un panorama général des êtres vivants qui constituent la biodiversité.
ISBN : 978-2-7598-0838-0
Prix : 29 €



Cet ouvrage présente la contribution de la chimie dans les enjeux énergétiques actuels et à venir.
ISBN : 978-2-7598-0973-8
Prix : 24 €

Cet ouvrage utilise le prétexte d'un voyage aérien pour soumettre au lecteur toutes les notions scientifiques qui peuvent se rattacher à l'environnement d'une telle expérience.
ISBN : 978-2-7598-0824-3
Prix : 16 €



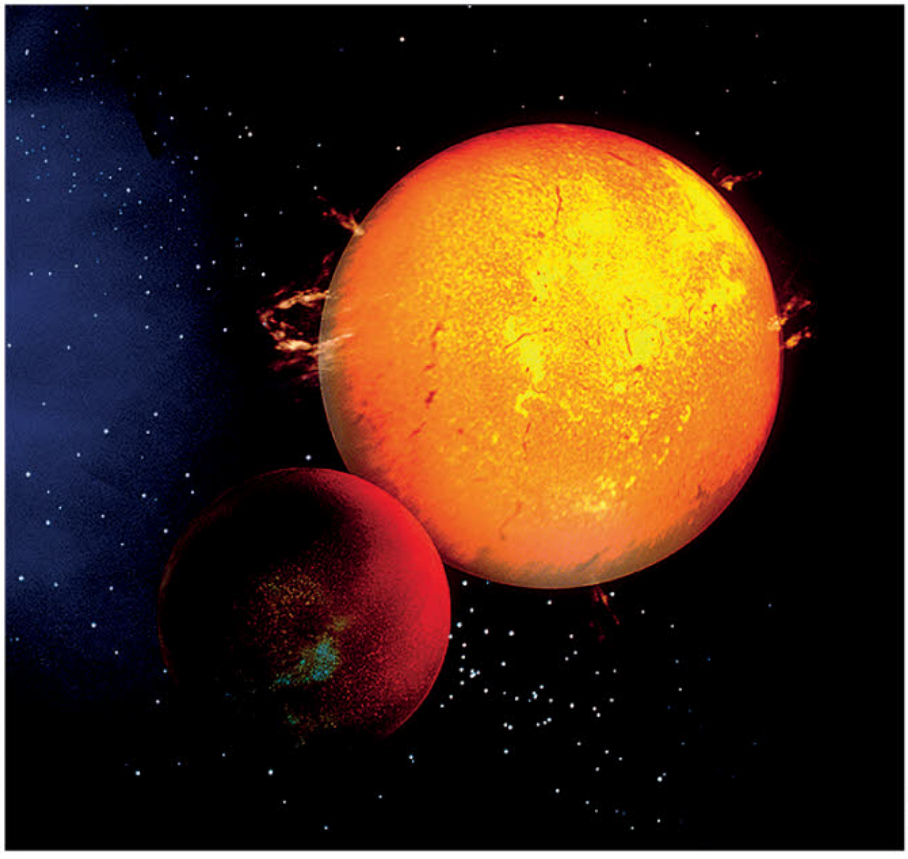
Cet ouvrage relate de façon très vivante et aisément accessible la vie et l'oeuvre d'un savant qui peut encore servir de modèle aux chercheurs de notre temps.
ISBN : 978-2-7598-0999-8
Prix : 25 €

Une question ?
livres@edpsciences.org
01 69 18 75 75

www.edition-sciences.com

edp sciences

Sommaire



SPL/COSMOS

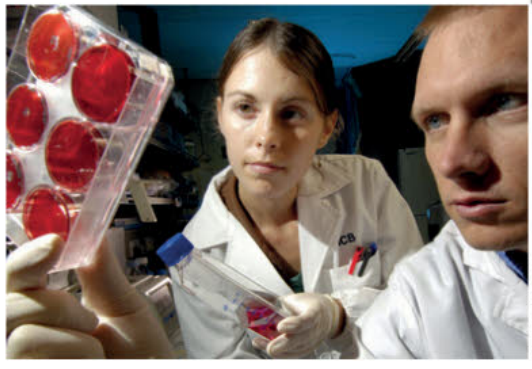
Exoplanètes : une vie sous d'autres soleils ? P.6

INRA

L'intelligence des plantes P.54

BRUNO CHAROY/PASCO & CO POUR SCIENCES ET AVENIR

Marc Pechanski P.38



THE N. Y. TIMES/REA

Cellules souches : le corps réparé P.26

IMAGE COURTESY BOSTON DYNAMICS

Robots à tout faire P.45

5 ÉDITO
Gutenberg 2.0

FONDAMENTAL

6 Exoplanètes : une vie sous d'autres soleils ?
11 Valse folle au cœur des galaxies
12 Pages Repères
16 Higgs : il ne manquait plus que lui
18 Pour quelques positons de plus
20 Michel Spiro : « Nous nous inscrivons dans l'histoire de l'Univers »
22 L'ordinateur fait ses preuves

SCIENCES DE LA VIE

26 Cellules souches : le corps réparé
30 Un être humain sans réplique
32 Pages Repères
34 Le cancer mieux traité
36 Une hérédité sous influence
38 Marc Peschanski : « Que vaut le progrès s'il ne bénéficie pas à tous ? »

TECHNO

40 La révolution des sans-pilotes
45 Robots à tout faire
46 Spatial : le privé s'envoie en l'air
48 Les promesses du graphène
50 Pages Repères
52 Viktor Mayer-Schönberger : « Le déluge numérique va bouleverser nos vies »

ENVIRONNEMENT

54 L'intelligence des plantes
59 Rencontres dans les abysses
60 Pierre-Henri Gouyon : « Il faut remettre en route le moteur de la biodiversité »
62 Pages Repères
66 Electricité : un réseau plus souple
68 Les plantes défient le tout-pétrole

PASSÉ

70 Denisova, nouvel *Homo*
72 Pages Repères
78 Gaulois, les maîtres du fer
80 Pascal Depaepe : « Laser et ADN changent notre vision de l'histoire »
82 LIVRES

Qui se souvient de Monsieur Parmentier ?

La vulgarisation de la pomme de terre en a fait le savant méconnu le plus célèbre de France, car elle a occulté les autres domaines de recherche de ce pharmacien agronome trop discret qui s'efforça obstinément de rendre la vie des Français plus facile et plus saine. La célébration, cette année, du bicentenaire de sa mort est l'occasion de revisiter la carrière de ce géant des sciences. Organisée par la Fondation Paris Descartes et sa présidente Martine Aiach, la commémoration nationale s'est ouverte le 23 septembre 2013 à la faculté de pharmacie de l'Université Paris Descartes.

Né le 12 août 1737 à Montdidier, en Picardie, Antoine-Augustin Parmentier travaille dès l'âge de treize ans chez un parent apothicaire. A 16 ans, il entre dans une officine parisienne. Selon ses maîtres, le jeune homme possède toutes les qualités d'un excellent pharmacien, mais il manque d'argent pour espérer s'installer. Il s'enrôle donc, en 1757, dans les services de santé des armées de Louis XV, engagées dans la Guerre de Sept ans. Il a presque vingt ans et se distingue par sa bravoure et son efficacité. Fait prisonnier en tentant de recueillir des blessés au front, il passe trois semaines dans une geôle prussienne où ses repas se limitent à une bouillie tirée d'un tubercule appelé "pomme de terre", habituellement réservée aux cochons en France. Constatant que sa santé ne subit aucune altération, Parmentier en conclut que les pommes de terre possèdent des qualités nutritives. C'est le début d'un cycle de recherches qu'il mènera toute sa vie…

A son retour en France, Parmentier décide de lancer une croisade contre les disettes qui anémient le royaume et provoquent tant d'émeutes. Dès 1772, l'Académie de Besançon couronne ses travaux où la pomme de terre tient une place importante. De la famille de la mandragore et de la belladone, elle a le mauvais œil. La rumeur l'accuse même de véhiculer la lèpre. Parmentier va s'employer à la réhabiliter. En marge de ses travaux, il multiplie les articles dans la presse et plante même des tubercules dans le champ de manœuvre militaire des Sablons (à Neuilly) en 1786. Il veut tout simplement démontrer aux Parisiens que la pomme de terre peut pousser dans les sols les plus pauvres.

Parmentier étudie avec la même passion les qualités nutritives de la châtaigne et du maïs. Il s'attaque à la carie du blé et travaille sur le sirop de raisin. Il réalise des expériences comparatives sur différentes sortes de laits et se penche sur la conservation des aliments. Le pain étant la nourriture de base des Français, il en fabrique avec des farines de substitution. Il travaille aussi sur l'amélioration de la salubrité des eaux de la Seine et milite pour la vaccination jennérienne.

© Alain Yaroulani

Portrait d'Antoine-Augustin Parmentier, *peinture de François Dumont l'Aîné.*

Le chaos de la Révolution ne l'empêche pas de poursuivre ses travaux. Sollicité par le Comité de Salut Public, par les comités de l'Assemblée Nationale qui traitent d'agriculture, d'hygiène ou de secours aux pauvres, il siège aussi à la Commission chargée de créer le calendrier républicain. Déclaré suspect en novembre 1793, il part précipitamment en mission pour Marseille, échappant ainsi à la guillotine.

Sous le Directoire et le Consulat, Parmentier devient un savant écouté, respecté, qui participe à toutes les entreprises humanitaires de l'époque. En 1800, Bonaparte le nomme premier pharmacien des armées et il figure parmi les fondateurs du Service de santé des armées. Membre de l'Institut depuis 1795, officier de la Légion d'honneur, auteur de plus de cent quatre-vingt-neuf publications, mais toujours modeste et discret, il va continuer d'œuvrer pour le bienfait de ses concitoyens jusqu'au terme de sa vie, le 17 décembre 1813, à l'âge de soixante-seize ans.

Anne Muratori-Philip

FONDATION UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES

Édito

HORS-SÉRIE SCIENCES ET AVENIR

33, rue Vivienne 75083 Paris cedex 02
Tél. : 01.55.35.56.00.
Fax : 01.55.35.56.04.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice de la rédaction
Dominique LEGLU 56.02
Rédactrice en chef Aline KINER (assistée de Vincent REA pour ce numéro) 56.42
Secrétaire de rédaction Florence LEROY 56.36
Directeur artistique Jean-Louis GILABERT 56.28
Photo-iconographie Andreina DE BEI (rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Illustration Betty LAFON 56.37
Photogravure Karine HUET 56.25
Collaborateurs Bernadette ARNAUD, Loïc CHAUVEAU, Olivier HERTEL, Azar KHALATBARI, Rachel MULOT, Hervé RATEL, Sylvie ROUAT, Elena SENDER
Ont collaboré à ce numéro
Mehdi BENYEZZAR, Laurent BRASIER, Cécile CAZENAVE, Marie-Noëlle DELABY, Clara DELPAS, Arnaud DEVILLARD, Jean-François HAÎT, Alexandre MOIX, Philippe PAJOT
Renseignements aux lecteurs, vente au numéro
Isabelle RUDI-HOUET 01.55.35.56.50/56.30.
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel de la REBERDIÈRE 56.06
Comptabilité Mélanie BENKHEDIMI 56.14, Nathalie TREHIN 56.12,
Assistante de direction Valérie PELLETIER 56.01

Abonnements :
01.40.26.86.11
142, rue Montmartre, 75002 Paris

Publicité Médiaobs
44 rue Notre-Dame-des Victoires 75002 Paris
Tél. : 01.44.88.97.70 / Fax : 01.44.88.97.79
Pour joindre votre correspondant par téléphone, composez le 01.44.88 suivi des 4 chiffres qui figurent à la suite de son nom ; pour adresser un email à votre correspondant, l'initiale de son prénom puis son nom suivi de @mediaobs.com.
Directrice générale Corinne ROUGÉ 93.70 assistée de Marie-Noëlle MAGGIES 93.70
Directeur de publicité adjoint
Sylvain MORTREUIL 97.75
Responsable WEB Romain COUPRIE 89.25
Assistante commerciale Séverine LECLERC 39.75
Exécution Nicolas NIRO 89.26
Administration des ventes Caroline HAHN 97.58
Ventes :
Directeur commercial
Jean-Claude ROSSIGNOL 01.44.88.35.40
Directrice commerciale adjointe
Paule COUDERAT 01.44.88.34.55
Directeur des ventes Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Philippe MENAT 01.44.88.35.02 assisté de Lina QUACH 34.54
Relations extérieures
France ROQUE 01.44.88.35.79
Sciences et Avenir SARL
Gérance : Claude PERDRIEL
Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Vente au numéro, **33, rue Vivienne, 75002 Paris.** Tél. : 01.55.35.56.00. Fax 01.55.35.56.04. Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, Service abonnements, 142, rue Montmartre, 75002 Paris. Tél. : 01.40.26.86.11. Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros) : 35 e. 1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 e. Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : ID OBS, 10-12, place de la Bourse, 75002 Paris. Tél : 01.44.88.34.34.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 55491.
Distribué par NMPP.
Photogravure :
PCH, 10-12, place de la Bourse 75002.
Dépôt légal : 562. Imprimerie : Sego, Taverny.
Printed in France.

EMILE LORAUX / PICTURETANK

Gutenberg 2.0

« Un moment Gutenberg. » Voilà ce que nous sommes en train de vivre, selon Viktor Mayer-Schönberger, spécialiste d'internet à l'université d'Oxford. Au XV^e^ siècle, avec l'invention de l'imprimerie, la quantité d'informations disponibles en Europe avait doublé en cinquante ans. Aujourd'hui, avec les nouvelles technologies, c'est tous les trois ans qu'elle est multipliée par deux. Chacun de nous aurait accès à 320 fois plus de données que n'en contenait en son temps la bibliothèque d'Alexandrie !

Tout va plus vite. Pas seulement le traitement des connaissances, mais aussi leur émergence. Dans chaque domaine, ou presque. Toujours plus d'énergie au sein des accélérateurs de particules, et voici capturé le boson de Higgs, attendu depuis plus d'un demi-siècle ; toujours plus de précision dans les instruments d'observation du ciel, et le nombre d'exoplanètes détectées explose. L'infiniment grand de l'Univers comme l'infiniment petit de la matière, se découvrant telles des poupées russes, révèlent une nouvelle physique. Les techniques de décryptage de l'ADN chahutent l'inventaire du vivant. Les thérapies cellulaires, géniques, protéiques, font irruption en médecine...

Affluant à vitesse numérique, ces nouvelles informations s'accumulent et se bousculent sur les étagères de notre bibliothèque virtuelle. Le désordre et la confusion menacent. Et si nous prenions le temps d'un peu de rangement ?

Avec ce hors-série, nous vous proposons de faire le point sur ce qu'il faut savoir de la science aujourd'hui. Pour comprendre le monde dans lequel nous vivons, et celui qui se prépare. Décrypter les nouvelles découvertes, mais aussi les mettre en perspective, déceler leurs implications. Les cellules souches, par exemple, dont on entend beaucoup parler. On nous promet qu'elles pourront, demain, réparer nos organes lésés, et pourquoi pas les remplacer. Une véritable fontaine de jouvence ! Surfant sur l'angoisse de vieillir, des entreprises en font déjà un juteux business. Mais où en est réellement la recherche ? Et, selon les mots du biologiste Marc Peschanski, *« est-ce vraiment de cela que nous avons besoin ? »*

Il y a une certaine jubilation à explorer cette bibliothèque en constante expansion, sautant de mots nouveaux – boson, antimatière, clonage, épigénétique… – en notions d'avenir. A rejoindre, dans leurs réflexions, des scientifiques qui poussent toujours plus loin les horizons de la connaissance, conscients que la certitude d'aujourd'hui sera demain battue en brèche, mais la curiosité et l'envie toujours en éveil.

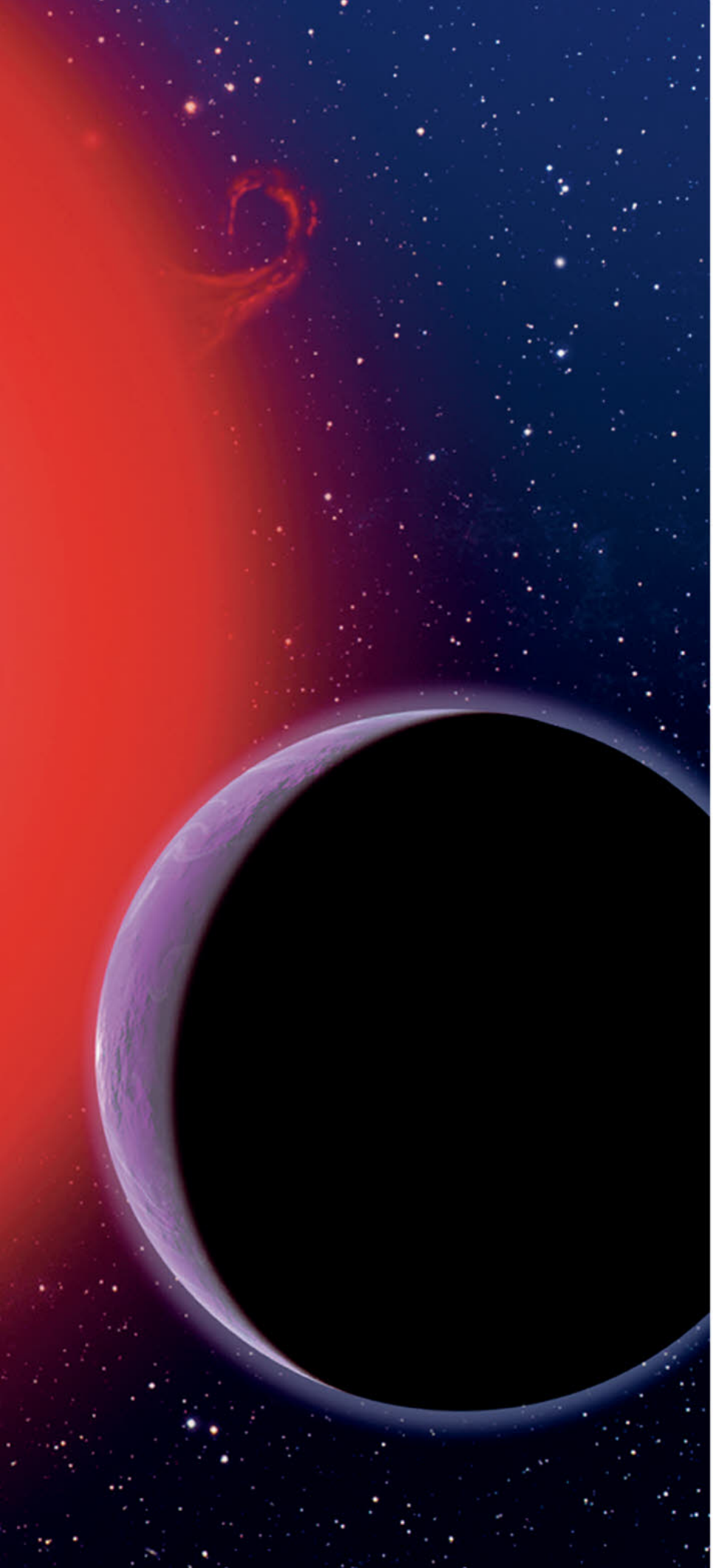
L'homme, nous dit le physicien Michel Spiro, présente une caractéristique surprenante : il se sert des outils dont l'a doté l'adaptation pour explorer le monde bien au-delà de ses besoins. Jusqu'aux secrets les plus infimes et les plus lointains.

A ce rythme-là, il va falloir agrandir les étagères !

ALINE KINER

La superterre GJ 1214b, à 40 millions d'années-lumière de la Terre. Elle pourrait être recouverte d'un océan de glace. Vue d'artiste.

EXOPLANÈTES
UNE VIE SOUS D'AUTRES SOLEILS ?



DAVID A. AGUILAR/CFA

Fondamental

Affûtant leurs instruments d'observation, raffinant leurs calculs, les astronomes ne cessent de débusquer de nouvelles planètes. Ils pourraient, dans les prochaines années, y découvrir la vie.

Et de douze ! En juin dernier, une équipe internationale a annoncé avoir détecté trois superterres *(lire les Repères p. 7)* dans la zone habitable de leur étoile, Gliese 667C, portant ainsi à la douzaine le nombre d'exoplanètes habitables connues dans notre Galaxie. Une découverte qui nous rapproche peut-être de ce qui n'est encore qu'un rêve d'astronome : trouver dans l'immensité de la Voie lactée une planète semblable à la Terre. Et, mieux encore, une planète abritant une vie extraterrestre… Car dans la zone habitable d'une étoile, ni trop loin ni trop près de celle-ci, les valeurs de température et de pression sont telles que l'eau peut y être liquide, condition que les exobiologistes estiment nécessaire à la présence de la vie.

Fournaise ou froid glacial

Son nom l'indique : rocheuse ou gazeuse, une planète extrasolaire, ou exoplanète, est un astre orbitant autour d'une étoile autre que le Soleil. Mais derrière cette dénomination générique se cachent bien des différences. Car selon la luminosité de l'étoile et sa distance d'avec la planète, la température de surface de celle-ci varie. Il peut y régner une fournaise ou au contraire un froid glacial, pour les planètes loin de leur étoile. Et en matière de vie, cela change tout !

C'est en 1995 que la première planète extrasolaire a été mise en évidence par les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz, à l'aide du télescope de 1,93 mètre de diamètre de l'Observatoire de Haute-Provence. En examinant, des mois durant, l'étoile 51 de la constellation de Pégase, ils ont ●●●

●●● constaté qu'elle semblait s'approcher et s'éloigner très légèrement de nous de manière périodique, comme si un objet massif tournait autour d'elle et perturbait sa vitesse. Ainsi ont-ils conclu à la présence d'une planète invisible : par les effets qu'elle induisait… Cette méthode dite des vitesses radiales *(lire p. 15)* – on mesure la vitesse d'approche et d'éloignement de l'étoile – reste, un peu moins de vingt ans après, l'une des plus efficaces pour repérer des exoplanètes : elle a permis d'en détecter cinq cents sur le millier connu à ce jour.

Plus modestes que Mercure

Une autre technique se révèle tout aussi précieuse quand, par chance, une étoile lointaine possède une planète, et que l'alignement des deux astres avec la Terre est parfait : celle du transit, ou de l'éclipse. Car lorsque la planète passe devant son étoile, l'éclat de celle-ci diminue très légèrement. Un mode de détection initié en 1999 avec la découverte de la planète HD 209458 b, elle aussi dans la constellation de Pégase. Il a permis, depuis, d'accrocher plusieurs centaines d'exoplanètes au tableau de chasse des astrophysiciens.

Même si les astronomes travaillent sur de nouvelles stratégies, ces deux procédés restent de loin les plus efficaces. D'autant qu'au fil des ans, leur précision s'est améliorée, permettant le repérage de planètes de plus en plus petites. Au milieu des années 1990, les astronomes ne parvenaient pas à mesurer de vitesses stellaires inférieures à 50 m/s. Soit une perturbation provoquée au moins par la masse d'une grosse planète orbitant autour de son étoile. Aujourd'hui, les spectromètres comme Harps, mis au point à l'Observatoire de Genève et placé au foyer du télescope de 3,6 mètres de La Silla, au Chili, descendent sous la barre du mètre par seconde, correspondant à la perturbation provoquée par des planètes plus petites, comme les superterres autour de Gliese 667C. *« Le gain de précision est incroyable. En quinze ans, nous sommes parvenus à découvrir des exoplanètes cent fois moins massives qu'au début »*, raconte Xavier Bonfils, chercheur à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble. Fin 2012, les astronomes ont même repéré des planètes plus modestes que Mercure, d'un diamètre 2,6 fois moindre que celui de la Terre.

De son côté, lancé en 2009, le télescope spatial Kepler de la Nasa a surveillé des milliers d'étoiles durant ses quatre premières années de fonctionnement. Il a été témoin du passage devant leur étoile d'une centaine d'exoplanètes et de milliers d'autres « candidats » dont le statut demande à être confirmé. Car d'autres objets astronomiques abondants dans la Galaxie, tels les binaires à éclipse (1), peuvent diminuer la luminosité d'une étoile de la même manière que le ferait une

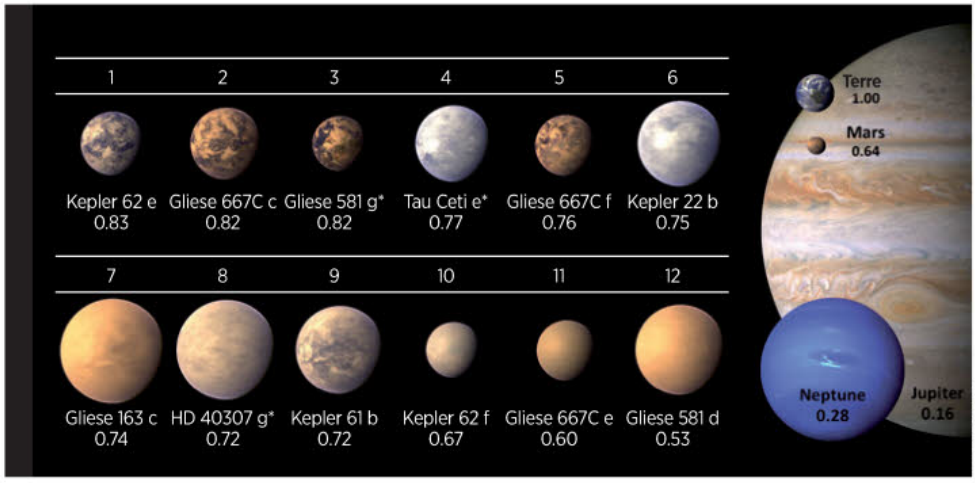
REPÈRES

JUPITERS Ce sont des exoplanètes géantes constituées essentiellement de gaz, semblables à Jupiter qui, dans notre Système solaire, est la géante absolue avec une masse de 317 fois celle de la Terre. Toutefois, elles sont souvent bien plus massives encore. Les « jupiters chauds » ont une orbite très serrée autour de leur étoile, d'où des températures de surface records de 1 000 °C à 1 600 °C. Les « jupiters froids » sont placés plus loin de leur étoile et leur température de surface est bien inférieure.

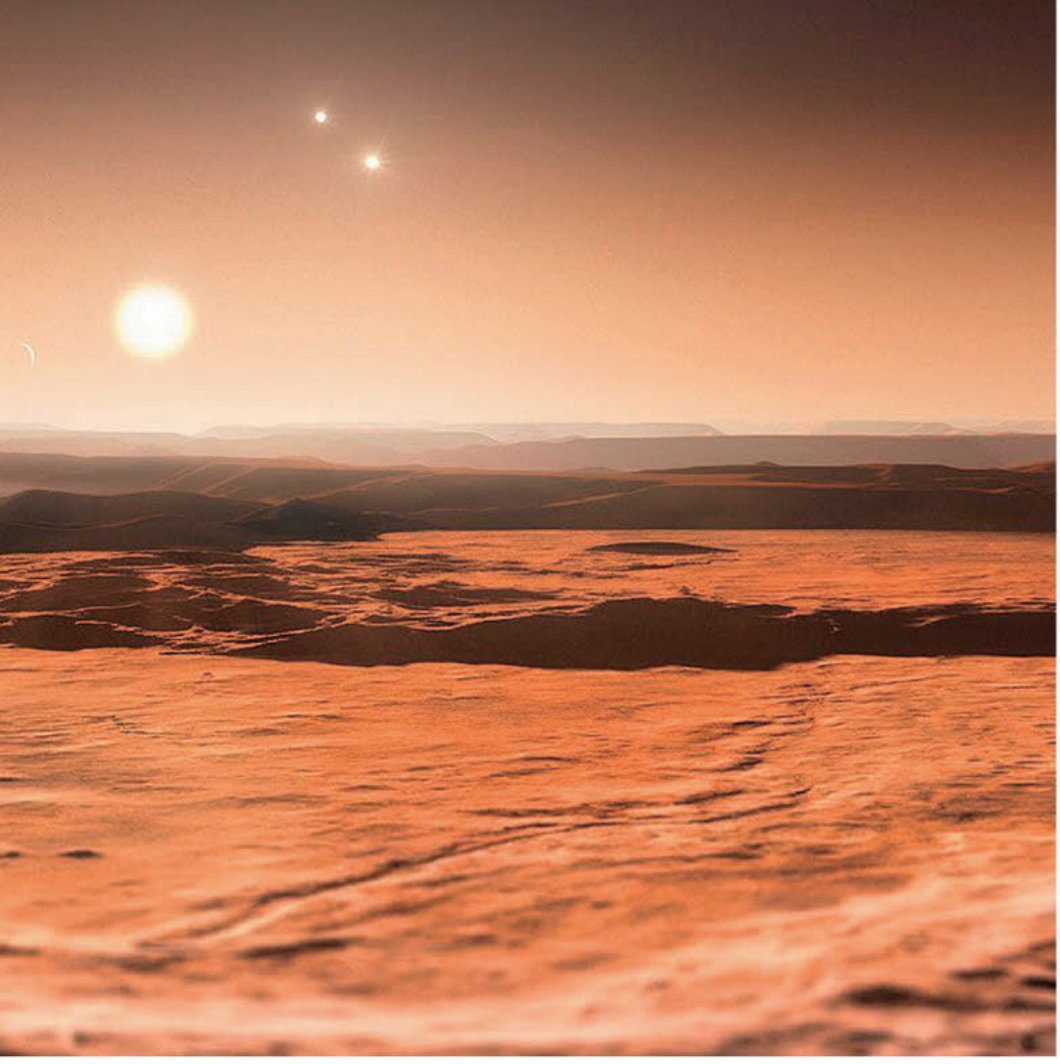
NEPTUNES Il s'agit d'exoplanètes plus modestes que les jupiters, mais dont la masse est toutefois de plus de dix fois celle de la Terre. A l'instar de Neptune dans notre Système solaire, leur structure est composée probablement en partie de roches et de glaces, et entourée d'une épaisse atmosphère gazeuse.

SUPERTERRES De masse comprise entre deux et dix fois celle de la Terre, elles ont une gravité suffisante pour retenir une atmosphère. Les « superterres chaudes », orbitant tout près de leur étoile, peuvent être couvertes d'océans de lave ou entourées d'une atmosphère de vapeur d'eau. Les « superterres froides », en revanche, sont des mondes glacés. Une superterre orbitant à bonne distance de son étoile, en zone dite habitable, pourrait abriter des océans d'eau liquide, condition essentielle à l'émergence de la vie telle que nous la connaissons.

SYLVIE ROUAT



Douze superterres sont à ce jour considérées « habitables ». Elles sont classées selon un indice de similarité avec la Terre, calculé d'après de multiples critères dont les principaux sont leur masse, leur densité et leur distance d'avec leur étoile mère. La Terre, Mars, Neptune et Jupiter sont représentées pour indiquer l'échelle.



M. KORNMESSER/ESO

Sous d'autres étoiles (Gliese 667A et Gliese 667B, à droite), un autre système solaire, vu ici depuis la superterre Gliese 667C d. Au centre, illuminée par les étoiles, la superterre 667C e. Vue d'artiste.

planète. Comme ces candidats sont situés pour la plupart dans l'hémisphère nord céleste, cette vérification sera le travail du spectrographe Harps Nord qui vient d'être installé sur le TNG, télescope italien de 3,6 mètres de diamètre situé aux Canaries. *« Ces nouvelles analyses vont certainement multiplier le nombre de planètes confirmées de Kepler »*, estime Stéphane Udry, astronome à l'Observatoire de l'université de Genève et responsable scientifique de Harps Nord.

Agrégation de grumeaux

Près de vingt ans après la première détection, quel portrait peut-on dresser des exoplanètes ? Le « catalogue exoplanet.eu » en recense un total de 940 réparties en 726 systèmes planétaires, dont 146 systèmes multiples. Un nombre important, qui permet déjà aux chercheurs de se faire une idée de la fréquence de ces systèmes dans notre Galaxie. Les études statistiques réalisées à l'aide de ces chiffres convergent vers un résultat principal : dès lors que l'on parvient à détecter des objets de la taille de Neptune ou au-dessous, le nombre d'exoplanètes explose. *« Plus d'une étoile sur deux de la Galaxie posséderait, sur une orbite proche, des planètes de taille comprise entre celles d'une superterre et de Neptune »*, explique Christophe Lovis, spécialiste des exoplanètes à l'Observatoire de l'université de Genève *(lire l'encadré p. 8)*. De ce tableau, on conclut que notre Système solaire, avec seulement quatre planètes (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) jusqu'à l'orbite de Mars, est atypique. La plupart des systèmes recensés sont en effet beaucoup plus compacts : dans le même espace autour de leur étoile, ils contiennent sept ou huit planètes.

La théorie de la formation des systèmes planétaire s'en trouve bouleversée ! Quand ils ne disposaient que d'un seul échantillon, notre Système solaire, les astronomes avaient élaboré un modèle qui fonctionnait assez bien : des planétésimaux (2) qui se forment à partir d'un disque protoplanétaire puis agrègent des grumeaux, se transformant petit à petit en planètes. Aujourd'hui, avec des centaines de systèmes planétaires très différents, la tâche se complique. *« Cette découverte étonnante que les planètes de petite masse sont nombreuses près de leur étoile n'avait pas vraiment été anticipée par les modèles »*, confie Christophe Lovis.

Graphite et diamant

A Berne autour de Willy Benz et à Santa Cruz autour de Douglas Lin, par exemple, les astronomes tentent de simuler la formation d'un système planétaire depuis son origine : partant d'un système protoplanétaire et incluant un maximum de phénomènes physiques et chimiques (gaz, interactions entre les noyaux rocheux et glacés qui se forment, migrations, etc.), ils espèrent arriver, au terme de calculs complexes, à un résultat compatible avec les observations. Problème : *« Le plus souvent, celles-ci ne fournissent pas la composition des astres*, regrette Christophe Lovis. *De sorte que les modèles de formation manquent de contraintes. »* Sans connaître l'état final du système, il devient du coup délicat de vérifier les simulations…

Les méthodes de détection, toujours plus perfectionnées, achoppent donc encore sur la composition des exoplanètes. Toutefois, lorsqu'on a la chance de déceler la même planète par les deux méthodes – celle du transit indique le rayon, tandis que celle des vitesses radiales fournit une indication de masse –, on peut en déduire la masse volumique, parfois révélatrice. Ainsi, la ●●●

DR

« Un grand nombre d'exoplanètes sont recouvertes de nuages ou de brume, ce qui rend difficile l'analyse de leur composition »

Christophe Lovis

A. SANTERNE/ESO

●●● planète 55 Cancri e, repérée par le satellite Kepler dans la constellation du Cancer, a huit fois la masse de la Terre pour deux fois son rayon, ce qui, sur des arguments de masse volumique et de thermodynamique, a permis à l'astrophysicien Nikku Madhusudhan, de l'université de Yale, d'y voir une planète *« couverte de graphite et de diamant plutôt que d'eau et de roches »*.

Si le cœur de ces planètes révèle doucement ses secrets, on commence aussi à en savoir plus sur leur ciel. Pour certaines géantes gazeuses, telle HD 209458 b, les astronomes ont pu analyser la manière dont la lumière de l'étoile est altérée lorsqu'elle traverse l'atmosphère de la planète. Une telle altération se traduit par des raies d'absorption du spectre caractéristiques de la composition de l'atmosphère traversée.

La chlorophylle, molécule de vie

Quelques molécules sont ainsi décelées, mais là encore, il faut surmonter beaucoup d'obstacles. *« Les mesures sont difficiles et les données très lacunaires, de sorte qu'on peut à peine parler de spectre*, prévient Christophe Lovis. *De plus, un grand nombre d'exoplanètes sont recouvertes de nuages ou de brume, ce qui rend l'analyse plus compliquée. »* Voilà pourquoi une découverte n'est assurée que lorsque la détection a été réalisée à plusieurs reprises, par des équipes indépendantes, et sur plusieurs jeux de données. On peut ainsi affirmer que de la vapeur d'eau a été observée sur une poignée de planètes, ainsi que du monoxyde de carbone et même du méthane.

Car le but ultime des chasseurs de planètes reste la découverte d'une exoterre, une planète semblable à la Terre qui abriterait la vie. Pour y parvenir, il faudrait y déceler des « biomarqueurs », molécules caractéristiques de la vie, comme la chlorophylle ou l'ozone. Les simulations indiquent que le prochain gros télescope spatial JWST, successeur du Hubble Space Telescope, sera probablement en mesure d'en détecter sur des planètes de la taille de la Terre, orbitant autour de petites étoiles. Le JWST devrait être satellisé autour de 2020, au moment même de la mise en service de deux télescopes de 30 mètres de diamètre, l'un à Hawaii pour observer le ciel de l'hémisphère Nord, l'autre au Chili pour le ciel du Sud. Ces deux télescopes géants devraient également réussir à débusquer la vie. Le paysage des systèmes planétaires dans notre Galaxie risque de s'en trouver, une nouvelle fois, chamboulé.

PHILIPPE PAJOT

1. Deux étoiles tournant l'une autour de l'autre en se cachant mutuellement.
2. Grains de poussière agglomérés en corps compacts.

Installé dans l'observatoire de La Silla, au Chili, le spectromètre Harps est dédié à la recherche d'exoplanètes.

Thérèse Encrenaz, *Les Planètes, les nôtres et les autres*, EDP-Sciences, 2010

Le catalogue des exoplanètes habitables (en anglais) : http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog

Des superterres habitables par milliards

Une étude publiée en 2011 a fait le bilan de six ans d'observation de 109 naines rouges (1) à l'aide du spectromètre Harps. Autour d'elles ont été détectées neuf superterres, dont deux dans la zone habitable. En extrapolant ce résultat, on peut conclure que 40 % de ces astres abritent une superterre habitable. Or notre Galaxie en comprend 160 milliards ! Des statistiques corroborées par l'étude, en janvier 2013, des données du satellite Kepler : environ 17 % des étoiles de la Voie lactée auraient des planètes de taille voisine à celle de la Terre. Par ailleurs, d'après les spectrographes Coralie et Harps, 10% des étoiles de type solaire de la Galaxie ont des planètes géantes. Conclusion : les exoplanètes sont présentes par dizaines de milliards dans la Galaxie !

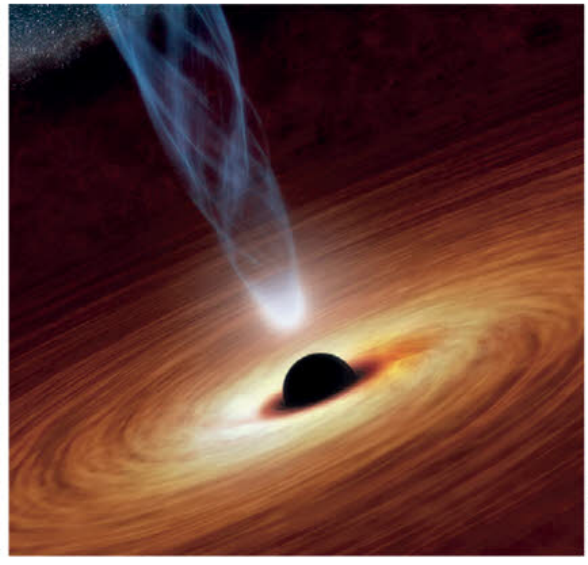
1. Moins massives et moins chaudes que le Soleil, les naines rouges sont les étoiles les plus abondantes de la Galaxie.

Trous noirs

Valse folle au cœur des galaxies

Parfois vifs comme l'éclair et tourbillonnants sur eux-mêmes, ces monstrueux « astrophages » déchirent les étoiles avant de les engloutir.

Certains trous noirs font des excès de vitesse ! En l'occurrence, ceux qui logent au centre des galaxies, qualifiés de supermassifs. Dernier contrevenant, celui de la galaxie spirale NGC 1365, à 56 millions d'années-lumière de la Terre. Ce monstre, dont la masse équivaut à 2 millions de Soleil, tourne sur lui-même à une vitesse proche de celle de la lumière, a révélé *Nature* le 28 février dernier. *« On le soupçonnait depuis longtemps : nombre de ces trous noirs supermassifs, dont celui qui occupe le centre de notre Voie lactée, tournent à des vitesses proches de la limite critique de la lumière »*, note Jean-Pierre Luminet, astrophysicien à l'observatoire de Paris-Meudon. Mais c'est la première fois, grâce aux satellites américain Nustar et européen XMM-Newton, que cette célérité est déterminée avec précision.



NASA/CALTECH

En s'approchant d'un trou noir, la matière chauffe et émet des rayons X de haute énergie. Vue d'artiste.

À la manière d'une balançoire

La mesure de la vitesse de rotation projette une nouvelle fois les trous noirs sur le devant de la scène astrophysique. Un trou noir, c'est une masse concentrée à l'extrême en phase d'implosion, à tel point qu'elle forme une sorte de puits gravitationnel. Rien de ce qui y tombe n'a la plus petite chance d'en sortir. La lumière elle-même est piégée dès qu'elle franchit les bords de la margelle, ce que l'on nomme l'horizon des événements car, une fois dépassé, plus aucune information n'en ressort. Au fur et à mesure que la matière – étoiles, nuages de gaz – s'approche de cette limite, elle tourbillonne de plus en plus vite. Ce faisant, elle est chauffée à blanc et émet de puissants rayons X. Dans le cas des trous noirs en rotation, le mouvement entraîne l'espace-temps – la trame qui compose l'Univers. Plus les trous noirs virevoltent rapidement, plus ils déforment cette trame, plus la matière peut s'en approcher. Et plus les rayons X sont tordus, trahissant par là ce qui se manigance.

Mais les trous noirs supermassifs n'intriguent pas seulement à cause de leur vitesse de rotation. Ils semblent en effet occuper le cœur de toutes les galaxies. Trou noir et galaxie auraient-ils une origine et un destin communs ? La masse de l'un étant proportionnelle à la taille du bulbe (le renflement central) de l'autre, cela semble probable. Mais ce n'est pas tout : trous noirs et galaxies grossissent ensemble. Ces dernières, la chose est admise, grandissent en fusionnant avec d'autres. A cette occasion, certains trous noirs peuvent également s'unir. En outre, les collisions de galaxies créent des remous parmi les nuages de gaz et les étoiles, ce qui en fait « tomber » quelques-uns dans le trou noir. Pour reprendre le cas de NGC 1365, sa vitesse élevée montre que la croissance du trou noir a été régulière – des à-coups l'auraient freinée. Comme si chaque ajout de masse lui avait donné un même élan, à la manière d'une poussée régulière sur une balançoire.

Plus les trous noirs virevoltent rapidement, plus ils déforment l'espace-temps

Bouffées de rayons X

C'est probablement de tels épisodes d'« astrophagie » qui ont récemment été repérés au cœur de galaxies jusque-là très paisibles, et d'où ont émergé soudain de violentes bouffées de rayons X, UV et optiques. En comparant les spectres de ces événements avec des travaux théoriques tels que ceux réalisés au début des années 1980 par Jean-Pierre Luminet et Brandon Carter, les chercheurs se sont rendus à l'évidence : les trous noirs passifs de ces galaxies venaient, par leurs puissants effets de marée gravitationnels, de déchirer une étoile – étoile qui, avant de glisser inéluctablement au fond du puits, avait formé un brillant disque de matière.

Le 28 mars 2011, un tel événement, découvert par le satellite Swift, a été suivi par des dizaines de télescopes. Immatriculé Swift J1644+57, il s'est produit au cœur d'une petite galaxie de la constellation du Dragon et a mis en œuvre des énergies phénoménales, correspondant exactement aux prévisions théoriques. *« C'est la signature directe de l'existence d'un trou noir »*, s'enthousiasme Jean-Pierre Luminet. Dans les prochaines décennies, les chercheurs veulent systématiser la recherche de telles ruptures d'étoiles qui, comme un ultime coup de projecteur, dévoilent la silhouette de leur invisible meutrier.

SYLVIE ROUAT

Aux origines de notre Univers

Avec, en moins d'un an, la découverte du boson de Higgs et l'image historique de l'Univers primordial livrée par le satellite Planck, l'astrophysique remonte à grands pas l'histoire du Cosmos.

Le ciel en chiffres

13,8 milliards d'années-lumière

L'âge de l'Univers, fixé en 2013 par les données du satellite Planck.

100 milliards d'années-lumière

Le diamètre de l'Univers visible depuis la Terre, une sphère limitée par « l'horizon cosmologique » : il est impossible d'observer au-delà de cet horizon, car la lumière des objets n'a pas eu le temps de nous arriver.

9 460 000 000 000 km

La distance parcourue par la lumière en une année, soit une année-lumière, ou encore 300 000 km/seconde.

- 270,4°c

La température moyenne de l'Univers contemporain. Soit à peine 3 degrés au-dessus du « zéro absolu ». Une seconde après le Big Bang, cette température était de 10 milliards de kelvins.

0,001

L'expansion annuelle de l'Univers. Cela signifie que chaque kilomètre d'espace augmente chaque année d'un millième de millimètre. Cette expansion fait fuir les galaxies lointaines à grande vitesse.

10^{22}

L'Univers compterait dix mille milliards de milliards d'étoiles visibles.

Neutrinos

1,04 et 1,14 PeV

C'est l'énergie record affichée par Bert et Ernie, deux neutrinos cosmiques repérés en 2011 (Bert) et 2012 (Ernie) par le détecteur IceCube, situé à l'intérieur de la calotte du pôle sud géographique. Un pétaélectronvolt (PeV) correspond à un million de milliards d'électronvolts. Selon les chercheurs, ces particules pourraient venir d'une autre galaxie ! Les neutrinos ultra-énergétiques ouvrent une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers et ses événements les plus violents.

Du Big Bang à l'ère des galaxies

0
Big Bang

10^{-43} seconde (après le Big Bang)
C'est le « mur de Planck », fixé par la mécanique quantique. On ne sait pas décrire l'ère primordiale durant laquelle les quatre interactions fondamentales n'en constituaient qu'une.

10^{-35} sec
La force forte se sépare et pourrait avoir provoqué une expansion brutale de l'Univers, qui l'aurait fait grossir d'un facteur d'au moins 10^{26}.

10^{-12} sec
Les forces faibles et électromagnétiques se séparent. Puis les particules fondamentales acquièrent une masse. C'est l'ère des quarks.

0,001 sec
La matière annihile l'antimatière.

100 sec
Les photons, qui jusque-là brisaient les unions protons-neutrons, ne sont plus assez énergétiques. Protons et neutrons commencent à se combiner en noyaux atomiques (fusion nucléaire). C'est l'ère de la nucléosynthèse primordiale.

De l'infiniment grand à l'infiniment petit

	1re FAMILLE	2e FAMILLE	3e FAMILLE
FERMIONS – Leptons Particules de matière insensibles à l'interaction forte qui assure la cohésion des noyaux	**Électron** Chargé négativement, il forme l'atome avec les nucléons (protons et neutrons) du noyau.	**Muon** Cousin de l'électron, 200 fois plus lourd.	**Tau** Autre cousin de l'électron, encore plus lourd, très instable.
	Neutrino-électron Sans charge électrique, et de masse très petite, il interagit rarement avec l'environnement.	**Neutrino-muon** Créé en même temps qu'un muon. Propriétés semblables à celles du neutrino-électron.	**Neutrino-tau** Créé en même temps qu'un tau. Même propriétés que le neutrino-électron.
FERMIONS – Quarks Particules de matière, formant protons et neutrons	u **Up** Charge électrique : + 2/3. Un proton en contient 2, un neutron 1. d **Down** Charge : -1/3. Un proton en contient 1, un neutron 2.	c **Charm** Cousin du quark up, plus lourd. s **Strange** Cousin du quark down, plus lourd.	t **Top** Cousin du quark up, encore plus lourd. b **Bottom** Cousin du quark down, encore plus lourd.

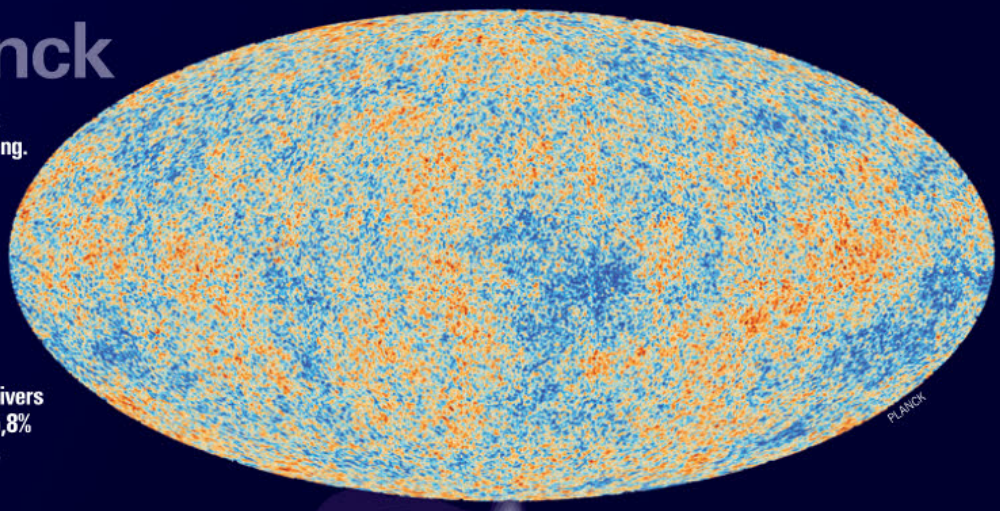
Dans le modèle standard, trois familles de quatre particules élémentaires, soit douze particules, constituent l'ensemble du monde. La matière ordinaire qui nous entoure est faite de particules de la première famille. Les autres ont peut-être existé au début du Cosmos mais n'apparaissent aujourd'hui qu'à très haute énergie, dans les accélérateurs, lors d'explosions d'étoiles ou collisions de trous noirs.

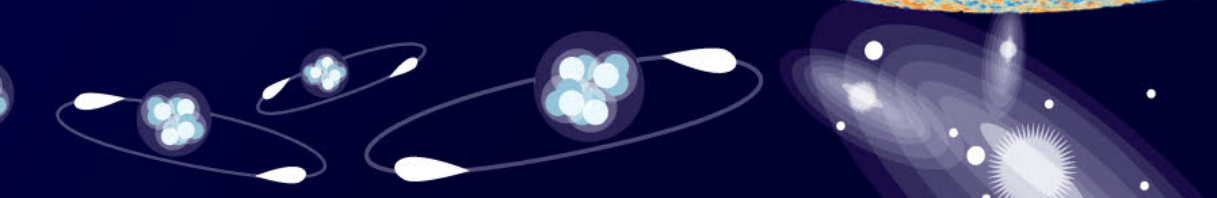
BOSONS				
	Photon Grain de lumière, vecteur de la force électromagnétique. Il relie les électrons au noyau, lie les atomes dans une molécule.	**Bosons W+, W-, Z0** Vecteurs de l'interaction faible, responsables de formes de désintégration radioactive.	**Gluons** Vecteurs de l'interaction forte, qui maintient les quarks dans les protons et neutrons, et ces derniers dans le noyau.	**Higgs** a donné sa masse aux autres particules, un dix-milliardième de seconde après le Big Bang.

Les 12 bosons de jauge, ou particules de rayonnement, assurent la transmission des forces entre les briques de matière que sont les fermions.

L'œil de Planck

Cette image due au satellite européen Planck montre l'Univers 370 000 ans après le Big Bang. Auparavant, il est extrêmement chaud et les particules excitées se renvoient les photons qui demeurent prisonniers. 370 000 ans après le Big Bang, il s'est refroidi à 3 000°C : noyaux atomiques et électrons s'associent pour former des atomes. La lumière, libérée, jaillit. C'est elle que l'on voit sur ce cliché, qui dévoile notamment les germes des galaxies. Selon ces données, l'Univers est composé de 4,8% de matière ordinaire, 25,8% de matière noire, et de 69,4 % d'énergie noire.





3 mn

La fusion cesse. La matière est composée à 75% d'hydrogène. C'est l'ère des noyaux.

370 000 ans

Les atomes se forment et les photons sont libérés. Ils forment le fond visible de l'Univers. C'est le début de l'ère des atomes (370 000 – 200 millions d'années). Une première génération d'étoiles géantes se forme, ainsi peut-être que les trous noirs primordiaux.

200 à 750 millions d'années

Les toutes premières galaxies se constituent.

Après 750 millions d'années

Ere des galaxies. Formation des structures de l'Univers : étoiles, galaxies et amas de galaxies.

PAGES RÉALISÉES PAR SYLVIE ROUAT
INFOGRAPHIES : MEHDI BENYEZZAR

Des milliards de terres et de soleils

Braqués vers le fond de la Galaxie, des télescopes engrangent une moisson de systèmes planétaires inconnus. Plus près de nous, Saturne s'est révélée pleine de surprises.

Saturne et ses lunes

La sonde américaine Cassini est en orbite dans le vaste système de Saturne depuis 2004. Grâce à elle, nous avons découvert qu'il fonctionnait comme un mini-Système solaire, avec Saturne dans le rôle du Soleil, fournissant à ses lunes de l'énergie gravitationnelle. La plupart de celles-ci sont considérées comme mineures. Mais quelques-unes ressemblent à des planètes miniatures et pourraient abriter de la vie.

0,69 g/cm³
La densité de Saturne la ferait flotter sur l'eau. Cela s'explique par une masse de 95 fois celle de la Terre pour un volume 900 fois plus grand.

Encelade

Au sud de cette lune de 500 kilomètres de diamètre jaillissent d'énormes geysers qui projettent à plus de 200 kilomètres de la surface des particules de glace, des composés organiques et peut-être de l'eau liquide. Il semblerait qu'un océan subglaciaire en soit le réservoir. De plus, Encelade paraît couverte d'une couche de 100 mètres de neige d'eau fraîche, signe qu'il y neige depuis au moins 100 millions d'années.

140 000 km
le diamètre du disque des anneaux

62
le nombre de satellites identifiés, parmi lesquels 53 ont été nommés.

Titan

Le plus gros satellite saturnien, dont la taille est intermédiaire entre Mercure et Mars. Lorsque la sonde européenne Huygens a traversé son épaisse atmosphère pour se poser à sa surface en 2004, on a découvert des paysages faits de rivières, de falaises et de mers ponctués d'îles. Depuis, la sonde Cassini y a repéré des montagnes, des lacs d'hydrocarbures, des volcans de glace (cryovolcans). Selon certains chercheurs, des formes de vie pourraient s'être développées dans un océan souterrain d'eau salée légèrement ammoniaquée.

Japet

Cette lune était connue pour ses deux « visages » : une face blanche et une face sombre. Il semblerait que la face sombre soit due à la sublimation de la glace d'eau dans cette région. Plus surprenant : Cassini a révélé en 2004 l'existence d'une haute crête équatoriale, qui s'étend sur 1300 kilomètres pour 20 km de large et 13 à 20 km de haut. Cette crête est constellée de cratères, ce qui indique qu'elle est ancienne. Il n'y a pas de consensus quant à son origine.

12 000 k
la température probable du noyau (en kelvins), qui explique pourquoi Saturne rayonne plus d'énergie qu'elle n'en reçoit du Soleil.

Le bestiaire des étoiles

Naines jaunes

Leur température de surface est d'environ 6 000 kelvins (K) et leur masse comprise entre 0,8 et 1,2 masse solaire. Notre Soleil est une naine jaune, comme environ 10 % des étoiles de la Galaxie.

Géantes rouges

Lorsque la naine jaune a épuisé son carburant (l'hydrogène), ses couches externes s'étendent très loin et l'hélium devient son carburant.

Naines blanches

C'est l'étape ultime de la naine jaune. Lorsque la géante rouge a épuisé son hélium, ses couches externes s'échappent et il ne reste qu'une étoile très dense – de l'ordre d'une tonne par centimètre cube – et chaude.

Géantes bleues

Les étoiles très massives – plus de 18 fois la masse du Soleil – brûlent vite leur hydrogène : leur température de surface atteint au moins 20 000 K et elles sont extrêmement lumineuses, d'où leur couleur bleue. A brûler trop vite, leur vie est courte, de 10 à 100 millions d'années.

Super-géantes rouges

Après avoir brûlé leurs réserves, les géantes bleues en fin de vie perdent de leur luminosité et rougissent, tandis que leurs couches externes s'étendent, à l'instar des géantes rouges.

Etoiles à neutrons

Lorsque les supergéantes rouges ont épuisé leur carburant, elles s'effondrent et éjectent avec violence leurs couches externes, devenant supernovae. Il ne reste alors au centre qu'une étoile à neutrons, petite et très dense.

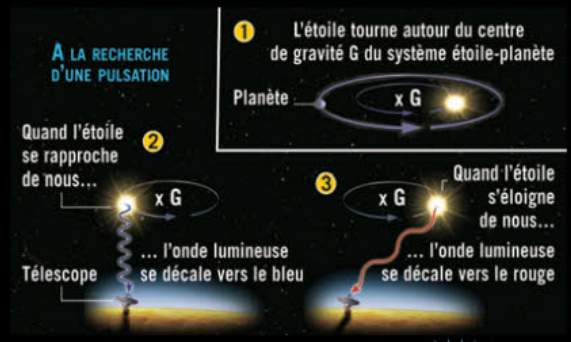
Naines rouges

Avec une température de surface entre 2500 et 5000 K, ces étoiles brillent peu. Leur masse varie entre 0,08 et 0,4 masse solaire. Elles seraient les astres les plus nombreux de l'Univers.

Naines brunes

Ce sont des étoiles de très faible luminosité, plus massives que les planètes géantes mais pas assez pour produire en leur sein une réaction nucléaire importante.

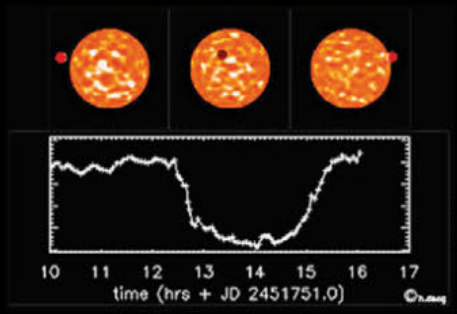
Comment détecter les exoplanètes



Méthode des vitesses radiales

532 planètes découvertes

C'est la méthode qui a permis le plus de découvertes. Elle mesure les mouvements d'une étoile sous l'influence du passage d'une planète. Car si une planète est captive gravitationnellement de son étoile, sa masse amène celle-ci à tourner autour d'un centre de gravité.

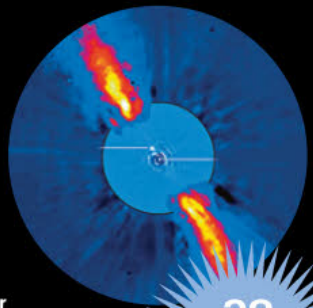


332 planètes découvertes

Méthode des transits

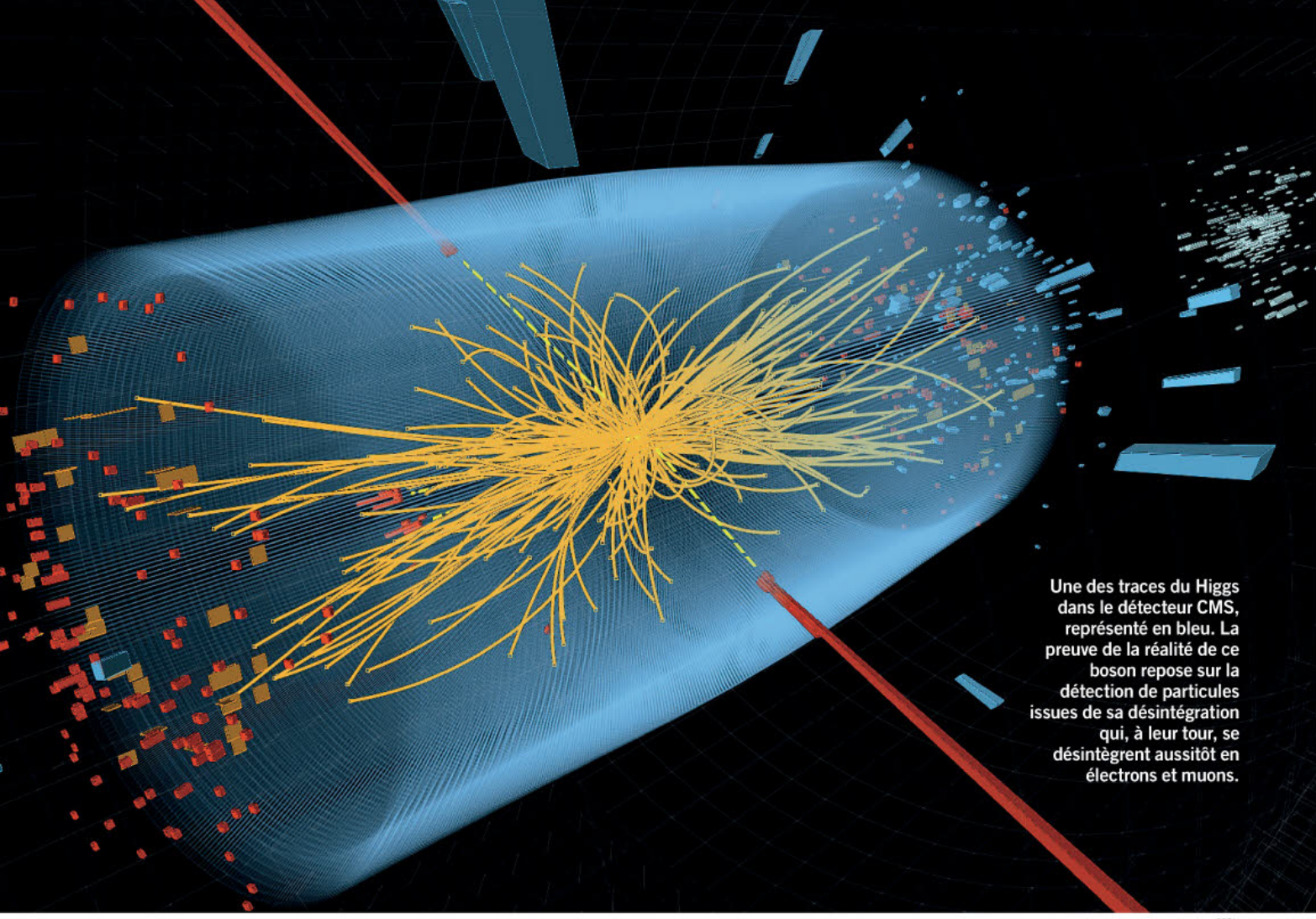
Le passage d'une planète devant son étoile diminue légèrement (de 1 à 0,1%) la luminosité de cette dernière, ce que l'on nomme une mini-éclipse. Cette méthode nécessite que l'observateur se trouve dans le même plan que l'orbite de la planète, ce qui limite les possibilités. L'ombre de la planète permet d'en connaître la taille.

Imagerie directe



38 planètes découvertes

Un exercice difficile, car une planète a un éclat dix milliards de fois plus faible que son étoile. Les grands télescopes ont donné peu de résultats pour l'instant. Pour échapper au problème des perturbations atmosphériques, il vaut mieux se placer dans l'espace. Aussi les astronomes attendent-ils beaucoup du nouveau télescope spatial James Webb de la Nasa, prévu pour 2018.



Une des traces du Higgs dans le détecteur CMS, représenté en bleu. La preuve de la réalité de ce boson repose sur la détection de particules issues de sa désintégration qui, à leur tour, se désintègrent aussitôt en électrons et muons.

CERN

Boson de Higgs

Il ne manquait plus que lui...

En inscrivant enfin à leur tableau de chasse la particule la plus désirée du modèle standard, les physiciens ont dégagé la voie pour de nouvelles théories.

Le 4 juillet 2012, les physiciens du monde entier n'en crurent pas leurs oreilles. Le Cern, le centre européen de recherche en physique des particules, venait de mettre fin à une quête de plus d'un demi-siècle en annonçant la découverte d'une particule *« compatible avec le boson de Higgs »*, ayant la caractéristique essentielle qu'on lui prêtait : une masse d'environ 125 GeV (gigaélectronvolt). Pour l'obtenir et l'identifier, il a fallu mobiliser plus de 5000 personnes travaillant sur deux expériences distinctes, Atlas et CMS, des détecteurs du LHC, l'accélérateur de particules le plus puissant au monde, capable d'atteindre les gigantesques énergies des tout premiers instants de l'Univers. Epoque où – selon la théorie – le Higgs a dû exister.

Cette découverte vient confirmer un monument de la physique appelé le « modèle standard », qui regroupe toute notre compréhension actuelle du monde. La matière de l'Univers est composée de douze particules *(voir le tableau p. 13)* soumises à quatre forces : deux d'entre elles nous sont familières, la gravitation et la force électromagnétique qui rend compte de l'émission de la lumière. Les deux autres permettent d'expliquer le monde tel qu'on l'observe : l'interaction faible à l'origine de la radioactivité de certains éléments, et l'interaction forte, qui assure la cohésion du noyau atomique. Chacune de ces forces se manifeste par l'émis-

COFFRINI/AFP

« Pour moi, c'est vraiment incroyable... C'est arrivé de mon vivant ! »

Peter Higgs, physicien

sion d'une particule appelée boson – qui n'est pas une particule de matière. Le photon, boson « grain de lumière », représente l'interaction électromagnétique, tandis que le boson W est le messager de la force faible, le gluon celui de l'interaction forte, et le graviton, celui de la force gravitationnelle.

Modèe standard approximatif

A la fin des années 1960, le modèle standard semblait quasi complet… avant que ne surgisse une énigme. Deux Américains, Sheldon Glashow et Steven Weinberg, et un Pakistanais, Abdus Salam, posent l'hypothèse que dans les premiers instants de l'Univers, lorsqu'il était chaud et dense, la force électromagnétique et la force faible ne formaient qu'une seule interaction, la force électrofaible. Mais alors, pourquoi leurs bosons sont-ils si différents ? Sans masse pour le photon, massif pour le boson W. En 1967, Peter Higgs, Robert Brout et François Englert proposent une hypothèse : à cette époque aurait existé une autre particule – par la suite nommée boson de Higgs –, et c'est en interagissant ou non avec elle que certaines auraient acquis une masse et d'autres non. Un boson longtemps resté introuvable… au point qu'à l'annonce du Cern, Peter Higgs s'est exclamé : *« Pour moi, c'est vraiment incroyable… C'est arrivé de mon vivant ! »*

La découverte de cette brique manquante signe le début d'une ère nouvelle en physique. Car aux yeux de bien des physiciens, le modèle standard n'est qu'une approximation. En effet, il ne permet pas de forger une vision globale qui unirait la gravitation qui s'applique aux échelles astronomiques et la mécanique quantique du monde sub-atomique.

Les chercheurs travaillent aujourd'hui sur un après-modèle standard. Parmi les hypothèses les plus discutées : la supersymétrie, qui suppose que toutes les particules auraient leur double, ce qui, certes, multiplierait leur nombre… mais simplifierait de nombreux problèmes cosmologiques. Cette théorie prévoit l'existence de Higgs à plus hautes énergies. Pour les « attraper », il faudrait des installations autrement plus puissantes que le LHC.

AZAR KHALATBARI

Rayons cosmiques
QUAND LES ASTRES NOUS BOMBARDENT

CELA FAISAIT un siècle que la question demeurait sans réponse. Plus précisément, depuis que le physicien autrichien Victor Franz Hess avait révélé, en 1912, l'existence d'un flux de particules formé de protons à 90 %, d'électrons et de noyaux d'atomes : les rayons cosmiques. D'où venaient ces particules énergétiques qui bombardaient en permanence la haute atmosphère de la Terre ? Début 2013, le télescope spatial Fermi de la Nasa a apporté une première réponse : au sein de notre galaxie, ce sont les supernovae, explosions d'étoiles massives en fin de vie, qui accélèrent et éjectent ainsi des débris nucléaires… dont certains parviennent jusqu'à nous. Cette conclusion est fondée sur l'observation de deux restes de supernovae, IC443 et W44, pendant quatre années d'affilée.

Pour autant, l'énigme n'est pas entièrement résolue. Certes, les supernovae seraient à l'origine des rayons cosmiques ayant une énergie de l'ordre de 10^9 électronvolts (eV) – ce qui représente la très grande majorité de ces particules, soit 1 000 par seconde et par mètre carré. Mais chaque kilomètre carré de la surface de la Terre est percuté, en moyenne une fois par siècle, par une particule mille milliards de fois plus énergétique, de 10^{21} eV. L'origine de ces rayons de très haute énergie reste mystérieuse. Pour les recueillir et les étudier, l'observatoire international Auger installé en Argentine a déployé ses récepteurs sur une superficie totale de 3 000 kilomètres carrés. Ses premiers résultats indiquent qu'ils proviendraient de noyaux actifs de galaxies lointaines… De gigantesques trous noirs supermassifs *(lire p. 11)* capables d'accélérer des particules à des énergies similaires à celles déployées, sur Terre, dans certains accélérateurs. Inauguré en 2008, l'observatoire Auger devrait scruter le cosmos pendant vingt ans… Un temps que l'on espère suffisant pour identifier les poussières d'astres qui nous bombardent.

A. KH.

NASA/DOE/FERMI LAT/AURA/NSF, JPL-CALTECH/UCLA

Les restes de la supernova IC 443, qui a explosé il y a des milliers d'années. En magenta, les rayons cosmiques.

Antimatière
Pour quelques positons de plus

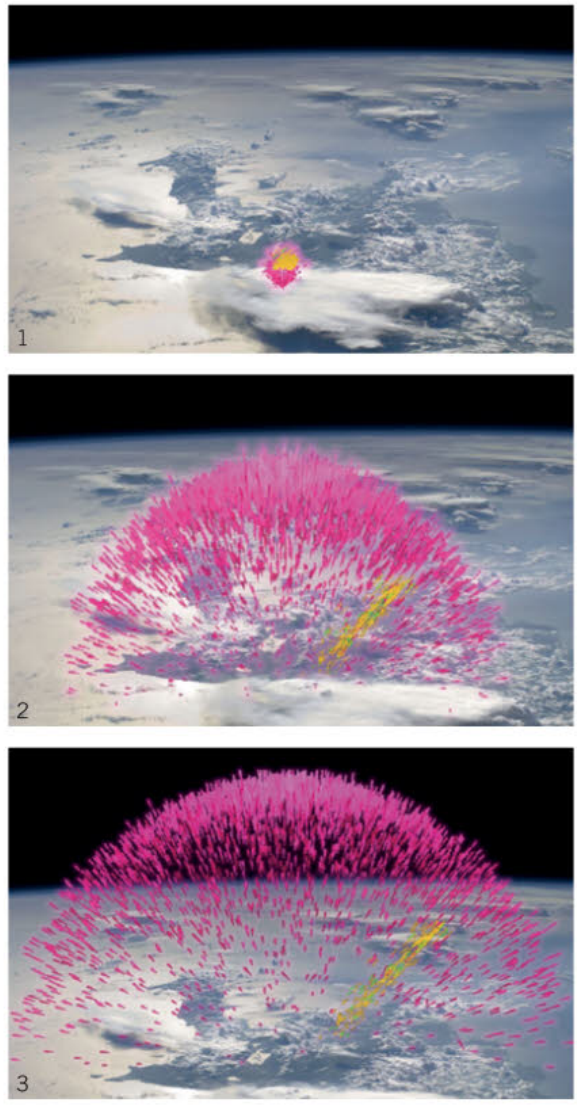
En avril dernier, des physiciens annonçaient avoir repéré dans l'espace un excès d'antimatière. Une première trace de l'insaisissable masse manquante, plus connue sous le nom de matière noire ?

À 400 kilomètres au-dessus de nos têtes, arrimé à la Station spatiale internationale (ISS), le spectromètre magnétique Alpha (AMS) scrute l'espace depuis le 16 mai 2011. Il comptabilise les rayons cosmiques, ces particules – débris de noyaux atomiques – qui ne parviennent pas à franchir l'atmosphère terrestre. Après dix-huit mois de service et 25 milliards de particules enregistrées, ses premiers résultats, livrés en avril 2013, ont fait l'effet d'une mini-bombe : non seulement AMS a repéré des particules d'antimatière – ce qui correspondait à son objectif premier – mais en plus, il en a détecté bien plus que la quantité attendue. Cet excès d'antimatière est bien intriguant. Pour beaucoup, il pourrait constituer un indice de la « masse manquante » que l'on cherche depuis plus de cinquante ans… AMS serait-il sur le point de résoudre le mystère ? Cette perspective a poussé le responsable de l'expérience, Samuel Ting, prix Nobel 1976 et chercheur au Massachusetts Institute of Technology, à parcourir les colloques pour présenter ces résultats préliminaires avec beaucoup d'enthousiasme.

Pure énergie

Le projet AMS est né au début des années 1990 : Samuel Ting voulait étudier les rayons cosmiques dans l'espoir de dénicher enfin de l'antimatière. Car depuis que le physicien Paul Dirac, prix Nobel en 1933, a formulé l'hypothèse de son existence, indispensable pour bâtir une théorie cohérente de la matière, l'antimatière était introuvable. Si l'on suit le modèle du Big Bang, tout semble indiquer qu'au cours des premières fractions de seconde de son existence, l'Univers contenait autant de matière que d'antimatière. Ainsi, chacune des particules de matière aurait son double d'antimatière. Celui de l'électron s'appelle le positon (*positron* en anglais) ou anti-électron : de même masse que son jumeau, il est porteur d'une charge positive là où l'électron a une charge négative. Le proton est, lui, associé à l'antiproton, et ainsi de suite… Dès que grains de matière et d'antimatière se rapprochent, ils se transforment en pure énergie. La particule et son antiparticule « s'annihilent » en rayons gamma. A l'inverse, dans certaines conditions, des rayons gamma « se matérialisent » en une paire particule-antiparticule.

Les hypothèses de Dirac ont été confirmées dès la mise en service des premiers accélérateurs de particules. Mais dans l'Univers d'aujourd'hui, seule la matière semble persister : les astronomes cherchent encore des astres faits entièrement d'antimatière. Malgré cette absence manifeste, des grains d'antimatière peuvent apparaître lors



NASA'S GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/J. DWYER, FLORIDA INST. OF TECHNOLOGY

Sur Terre, des phénomènes physiques comme les orages fabriquent de l'antimatière telle qu'en détecte AMS. Sur cette simulation, (1) les rayons gamma dus à l'orage (en rose) percutent les atomes de la haute armosphère (2), et libèrent (3) des électrons (en jaune) et des positons (en vert).

AMS, L'AIMANT QUI FAIT DÉVIER LES PARTICULES

L'élément de base d'AMS est un aimant de 1200 kg en alliage de néodyme. Son champ magnétique de 0,15 tesla courbe la trajectoire des particules chargées. En mesurant cette courbure, on distingue la matière de l'antimatière : sa direction change selon que la particule est chargée positivement ou négativement. Par ailleurs, plus la particule est énergique, moins sa trajectoire est courbée : la mesure du rayon de courbure permet donc d'estimer son énergie. Le détecteur AMS est complété par des sous-détecteurs qui aident à discriminer les particules.

des collisions de très haute énergie, dans les accélérateurs de particules, ou lorsque les rayons cosmiques percutent avec beaucoup d'énergie les noyaux d'hydrogène du milieu interstellaire, au-dessus de nos têtes. C'est précisément là qu'AMS a été placé…

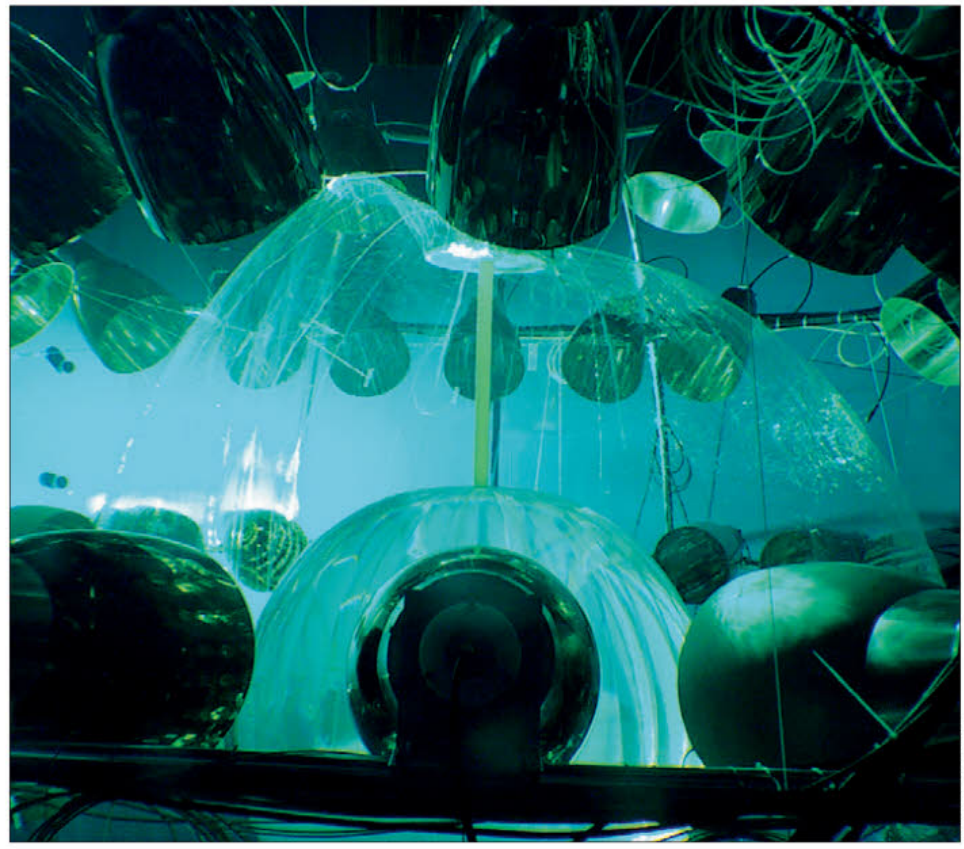
La masse manquante trahie ?

Dans son escarcelle, la sonde a donc récupéré 400000 positons en excès, dans une gamme d'énergies de 0,5 GeV à 350 GeV. *« Certains phénomènes stellaires encore incompris peuvent expliquer cet excès d'antimatière »*, avance Marco Cirelli, chercheur à l'Institut de physique théorique du CEA, à Saclay. Les étoiles denses que sont les pulsars, par exemple, sont des générateurs d'électrons et de positons à haute énergie. Mais l'hypothèse comporte trop d'inconnues pour que l'on puisse trancher en sa faveur.

Une autre explication pourrait rendre compte de cet excès d'antimatière : la présence de particules encore hypothétiques formant la « masse manquante » de l'Univers. La masse manquante (appelée aussi matière noire) est une des énigmes les plus tenaces de l'astrophysique, fondée sur une foule d'observations. Au sein des galaxies, par exemple, les étoiles tournent bien plus vite que les calculs le prévoient, et devraient en être éjectées, emportées par la force centrifuge de leur rotation… Pour expliquer pourquoi elles ne quittent pas une à une leur berceau galactique, les astrophysiciens ont supposé qu'une masse invisible exerçait sur elles son attraction gravitationnelle, se rajoutant à celle de la matière visible. Cette masse manquante représenterait 23 % du contenu de l'Univers. Après l'avoir cherchée sans succès, les chercheurs sont aujourd'hui convaincus qu'elle se présente sous forme de particules massives… dont la désintégration produirait ces positons.

Une hypothèse très séduisante pour les responsables d'AMS, qui se verraient bien annoncer la fin de la masse manquante. Ils devront s'armer de patience : la mission d'AMS est prévue pour durer aussi longtemps que l'ISS sera en orbite, soit, au bas mot, encore une décennie.

AZAR KHALATBARI



BOREXINO EXPERIMENT

La cuve de l'expérience Borexino à Gran Sasso, en Italie, vouée à la détection des neutrinos solaires.

Neutrinos
Une mystérieuse oscillation

C'EST SANS CONTESTE la plus fuyante des particules. Le neutrino est longtemps resté drapé de mystère, jusqu'en 1998 où, pour la première fois, l'observatoire japonais Kamiokande a mis en évidence, chez ce constituant élémentaire de la matière, un étrange phénomène quantique, appelé oscillation. Depuis, plus d'une dizaine d'expériences à travers le monde l'étudient de près.

De quoi s'agit-il ? Lorsqu'ils se propagent, les trois sortes de neutrinos *(voir le tableau p. 13)* ont la faculté de prendre l'identité de leurs cousins – ainsi, un neutrino électron peut se transformer en neutrino muon ou en neutrino tau – puis de revenir à leur première nature, et ainsi de suite. De ce fait, la même particule interceptée à des distances différentes ne présente pas le même visage. La découverte de ce phénomène a permis de résoudre l'énigme de la structure interne du Soleil. En effet, lors de toute réaction nucléaire, qu'elle ait lieu au cœur des étoiles ou dans les réacteurs, il y a émission de neutrinos. Les modèles estimant la température et la structure interne du Soleil indiquent que toutes les secondes, chaque centimètre carré de la surface de la Terre devrait recevoir 64 milliards de neutrinos de la part de notre étoile. Or les mesures aboutissaient toujours au même résultat : il manquait près du tiers des neutrinos escomptés… Le Soleil avait-il un cœur plus froid que prévu ? Les débats ont duré quelques décennies, jusqu'à ce que la mise en évidence du phénomène d'oscillation des neutrinos l'éclaire d'un jour nouveau. Une partie de ces particules avançaient masquées : les neutrinos électroniques attendus s'étaient en partie transformés en neutrinos muons.

L'étude fine du phénomène laisse encore apparaître des zones d'ombre

Ce mystère résolu, l'étude fine du phénomène d'oscillation laisse encore apparaître des zones d'ombre. L'écart entre la théorie et les observations amène certains physiciens à imaginer l'existence d'un quatrième neutrino, qui pourrait bouleverser la physique. **A. KH**

Interview

Michel Spiro, physicien

« Nous nous inscrivons dans l'histoire de l'Univers »

De l'infiniment grand à l'infiniment petit, les découvertes des dernières décennies ont bouleversé notre appréhension du monde. Et de la place que nous y tenons.

Quelles sont, pour vous, les grandes découvertes de la science sur l'infiniment grand et l'infiniment petit, ces dernières décennies ?

La première est d'avoir compris, au cours du siècle dernier, que le ciel avait une histoire. Nous nous sommes rendu compte que le moteur des étoiles était nucléaire, et qu'il avait une durée de vie : il s'allume dans une phase initiale, puis les étoiles connaissent une période assez longue de stabilité avant d'entrer dans une nouvelle phase durant laquelle le moteur s'épuise, et où elles finissent soit par s'éteindre en donnant naissance à une naine blanche, soit par exploser en supernova et relâcher dans le milieu interstellaire les éléments produits au cours des réactions nucléaires. Ces éléments servent à fabriquer d'autres générations d'étoiles, mais aussi des planètes. Les hommes eux-mêmes en sont constitués. Selon l'expression d'Hubert Reeves, nous sommes des poussières d'étoiles. Savoir que nous nous inscrivons ainsi dans l'histoire de l'Univers est un acquis majeur de la science du XXe siècle, à la fois la science microscopique, la science des étoiles et la physique nucléaire.

A quand remonte précisément la rencontre entre ces différents champs de la science ?

Le physicien Hans Bethe a été le premier, dans les années 1930, à évoquer l'hypothèse que la lumière rayonnée par les étoiles provenait de réactions nucléaires survenues en leur cœur. Ensuite, les astrophysiciens ont dégagé la perspective selon laquelle les étoiles connaissent des phases successives. Ils sont allés plus loin encore, découvrant comment le moteur de l'étoile se met en marche, avec un nuage d'hydrogène qui se condense et se réchauffe en son centre. Arrive un moment où la densité et la température deviennent si élevées qu'elles allument des réactions thermonucléaires. Ils ont ensuite regardé comment l'étoile fabriquait des éléments de plus en plus liés – le fer étant le plus lié de tous – jusqu'au moment où il n'y a plus de moteur nucléaire et où l'étoile explose. Elle façonne alors les éléments plus lourds que le fer, jusqu'à l'uranium. De génération en génération, le milieu s'enrichit. Il a sans doute fallu trois ou quatre générations d'étoiles pour donner naissance à tous les noyaux lourds que nous connaissons et dont nous sommes faits. Notre Soleil, par exemple, contient du fer, donc des éléments déjà fabriqués dans des étoiles précédentes (1).

Qu'avons-nous appris d'autre sur notre ciel ?

Au cours de la seconde partie du XXe siècle, nous avons compris que l'Univers, dans son ensemble, avait une histoire. Qu'il s'étendait et se refroidissait. En remontant dans son passé, à la manière d'archéologues, grâce aux lois de la physique, on le découvre de plus en plus chaud et de plus en plus dense. Au point que l'infinie diversité des structures – galaxies, étoiles, planètes… – que nous connaissons aujourd'hui disparaissent au profit d'une soupe indifférenciée : d'abord d'atomes, puis de noyaux, puis de particules élémentaires.

> « Ni ondes, ni particules, les champs quantiques sont un mélange des deux… et même plus ! »

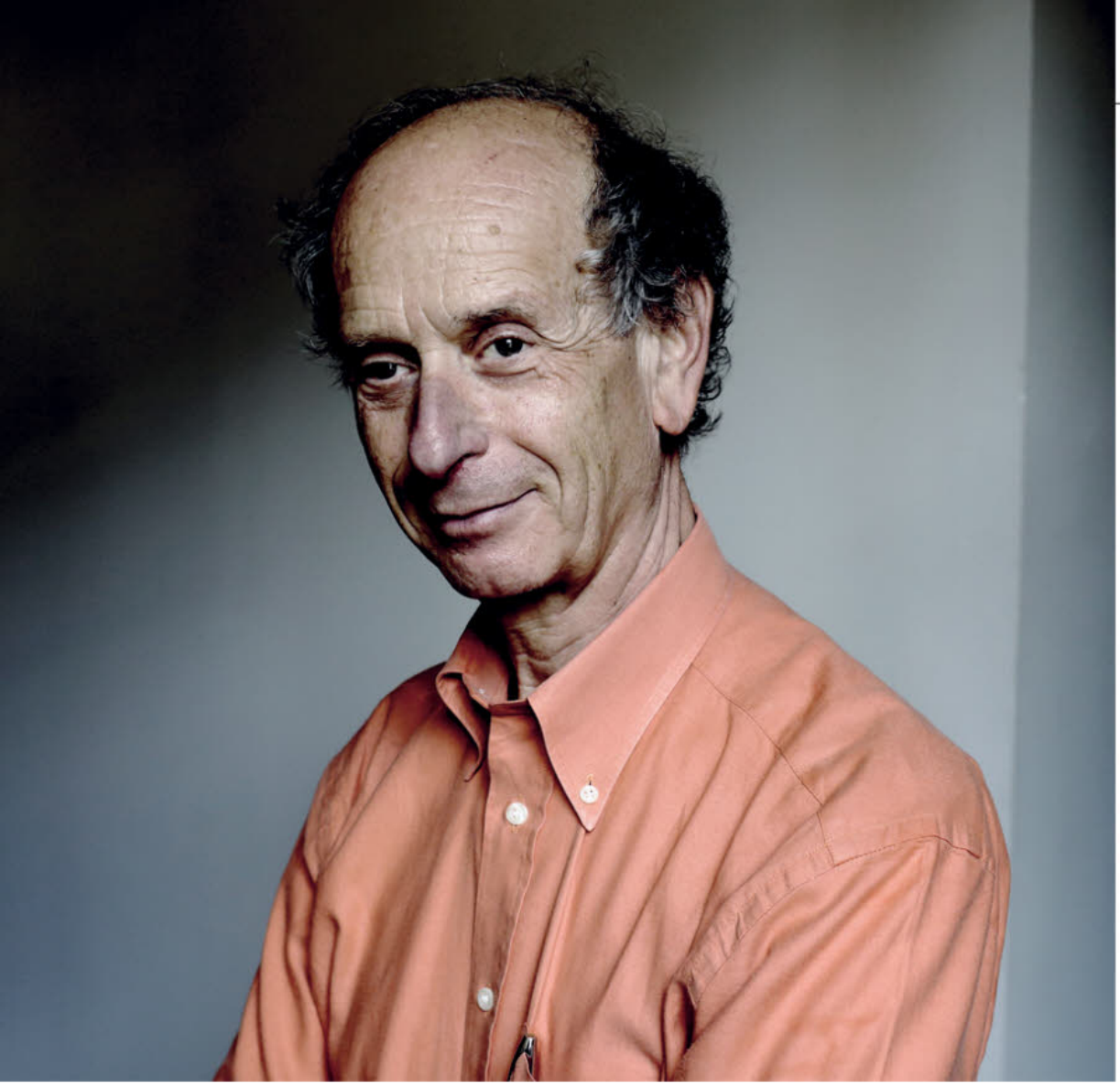
En avril 2013, le satellite Planck a fourni une image de cette soupe, 380 000 ans après le Big Bang, quand se formaient les premiers atomes. On y voit des fluctuations de température et de densité qui reflètent ce qui s'était passé auparavant, dans un univers encore plus chaud et dense, lui-même né d'autres fluctuations, celles du vide quantique.

La matière est-elle mieux comprise ?

La troisième grande découverte concerne en effet sa structure intime, que nous avons pu approcher grâce à ces microscopes ultrapuissants que sont les accélérateurs de particules. Nous avons compris qu'à un certain niveau d'élémentarité et de finesse, ni nos idées, ni les mots que nous utilisions – à savoir les particules et les forces – ne s'appliquaient plus. On est obligé de recourir à des concepts mathématisés qu'on appelle « champs quantiques ». Et en définitive, ce que les physiciens observent aujourd'hui dans les accélérateurs se traduit en termes mathématiques par des interactions entre ces champs, opérant dans le vide quantique.

A quoi ressemblent ces champs quantiques ?

Ils ne sont ni particules, ni ondes. Mais un mélange des deux… et même plus ! C'est une révolution conceptuelle. Dans la physique classique, le monde des particules et celui des forces sont totalement distincts : les forces sont les lois, et les particules subissent ces lois. D'un côté, comme le concevait Platon, le monde des concepts, des



MICHEL SPIRO, conseiller scientifique au CEA, a été président du conseil du Cern de 2010 à 2012 et directeur au CNRS de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) de 2003 à 2010. Derniers ouvrages parus : *Le Boson et le chapeau mexicain*, avec Gilles Cohen-Tannoudji (Gallimard Folio, 2013), et *La Physique des infinis*, avec Francis Bernardeau, Etienne Klein et Sandrine Laplace (La Ville brûle, 2013).

idées, de l'autre celui de la matière, de la réalité. Ici, les deux convergent. Forces et particules sont représentées toutes les deux, nous l'avons dit, par des champs quantiques. Il s'agit d'un concept matérialisé.

D'où une nouvelle vision en couches, en poupées russes. D'abord la matière avec la physique classique, puis les molécules avec la chimie, les atomes avec la physique quantique, les noyaux avec la physique nucléaire, les protons et neutrons avec la physique dite hadronique, et finalement les quarks et les électrons avec la théorie quantique des champs relativistes.

Comment tout cela fonctionne-t-il ensemble ?

A chaque couche, il est possible d'associer une théorie, sachant que dans cette couche et cette théorie affleurent la couche et la théorie d'en dessous. Ainsi, nous appelons modèle standard ce qui se passe au niveau des particules, celles qui résistent pour l'instant à toute analyse en termes de sous-structures, parce qu'avec une certaine modestie, nous pensons qu'il doit affleurer autre chose, la matière noire par exemple, dont ce modèle ne rend pas compte. Il y a probablement encore des particules et des sous-structures à découvrir, et un niveau de théorie à comprendre.

Ces différentes couches dont vous parlez correspondent aussi à des moments dans l'histoire de l'Univers…

Effectivement. Descendre dans les couches de la matière, c'est remonter l'histoire de l'Univers. Aujourd'hui la matière classique, et avant les molécules, les atomes, les noyaux, les protons, jusqu'à la soupe de quarks.

Vertigineux !

Pour moi, la grande question reste : comment se fait-il que l'homme parvienne à progresser sans cesse dans la compréhension de la matière et de l'Univers ? La théorie de l'évolution nous dit que nous avons été magnifiquement adaptés au milieu dans lequel nous évoluons et à la taille des objets auxquels nous avons affaire. On peut comprendre qu'avec les mathématiques, les concepts, les capteurs qu'il a conçus, l'homme soit équipé pour le milieu dans lequel il vit. Un milieu forcément classique. Mais avec ces mêmes outils, il parvient à descendre dans la matière et à remonter l'histoire de l'Univers dans un passé très lointain qui sort a priori du principe d'adaptabilité…

Nous sommes armés pour aller bien au-delà de ce qui nous a sélectionnés, au-delà du « à quoi ça sert ? ». C'est une caractéristique de l'être humain à laquelle je suis très attaché : explorer jusqu'où nous avons la capacité d'appréhender le monde.

PROPOS RECUEILLIS PAR ALINE KINER ET DOMINIQUE LEGLU
PHOTO : BRUNO CHAROY/PASCO & CO POUR SCIENCES ET AVENIR

1. Lire aussi « Le sursaut gamma, corne d'abondance de l'or », *in Sciences et Avenir* n°799, septembre 2013.

THIERRY PASQUET / SIGNATURES - BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Théorèmes

L'ordinateur fait ses preuves

Il y a quelques mois, le théorème Feit-Thompson, monument de l'algèbre, devenait une certitude. Grâce à des outils informatiques performants, nouveaux assistants des mathématiciens.

Septembre 2012. L'ultime composante d'un programme informatique est entrée dans l'ordinateur. Celui-ci la digère, agrège les milliers de briques élaborées par des dizaines de chercheurs et, après deux heures de calculs, rend son verdict : la preuve du théorème de Feit-Thompson vient d'être vérifiée. Ce théorème phare de la théorie des groupes *(lire l'encadré p. 23)*, publié en 1963 par les mathématiciens américains Walter Feit et John Thompson, est maintenant une certitude. Il aura fallu six ans d'efforts à toute l'équipe de Georges Gonthier, du Centre commun de recherche Inria-Microsoft de Saclay, près de Paris, pour parvenir à formaliser sa démonstration.

Les théorèmes, du grec « *theorema* » qui signifie « spectacle », « contemplation », focalisent toute l'attention des mathématiciens. Ce sont un peu des calculs à l'envers. Tout commence par un résultat dont on a l'intuition et qu'il faut prouver par un raisonnement logique construit à partir d'axiomes (1). Exemple le plus connu : le théorème de Pythagore. Dès 1800 ans avant notre ère, des Mésopotamiens remarquaient que le carré de l'hypoténuse d'un triangle rectangle était égal à la somme du carré des deux autres côtés. D'autres cultures anciennes, en Inde, Chine ou Egypte, avaient également découvert cette loi mathématique. Mais sa première formulation sous forme de théorème est grecque : elle a été publiée dans les *Eléments* d'Euclide.

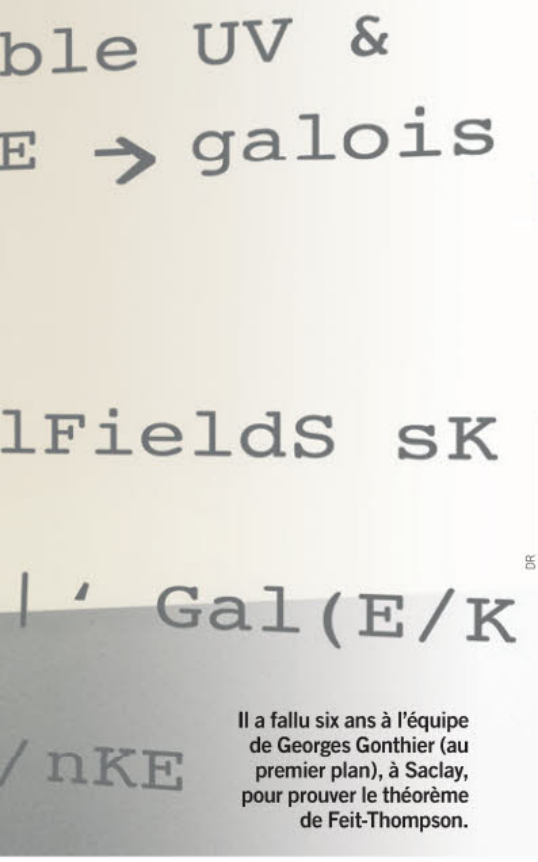
Aujourd'hui encore, les conjectures mettent parfois des siècles pour changer de statut. Certaines attendent encore… Une fois démontrés, les théorèmes restent vrais pour l'éternité. Problème : il faut être certain qu'il n'existe aucune faille dans la suite de raisonnements. Or le raisonnement humain est faillible, et comporte une part d'intuition. Mais aussi d'implicite : on ne redémontre pas à chaque calcul de preuve que 1 + 1 = 2 !

Finalement, le théorème est une construction sociale. Il est accepté dès lors que suffisamment de personnes sont convaincues de la justesse de la démonstration. Mais que dire des démonstrations si longues ou si difficiles que nul n'est capable de garantir leur exactitude ?

Avec l'irruption de l'ordinateur en mathématiques, la situation est devenue plus confuse encore. En 1976, les Américains Kenneth Appell et Wolfgang Haken publient la preuve que quatre couleurs suffisent pour colorier n'importe quelle carte sans que deux pays adjacents soient de la même couleur. Un théorème à l'énoncé simple, qui avait été

REPÈRES

Le nombre de théorèmes possibles est potentiellement infini. Chaque année, il s'en publie 2 500 nouveaux. Les mathématiques des trois années de licence en comprennent une centaine. Certains, très connus, ont plusieurs démonstrations : près de 300 pour celui de Pythagore !



Il a fallu six ans à l'équipe de Georges Gonthier (au premier plan), à Saclay, pour prouver le théorème de Feit-Thompson.

Interview — JEREMY AVIGAD *

« L'informatique pourrait amener à reformuler les mathématiques sur des bases nouvelles »

DR

Comment être certain qu'une preuve fondée sur un calcul informatique est correcte ?
Il n'existe pas de norme sur la manière dont les ordinateurs doivent être utilisés dans les preuves mathématiques. Mais des chercheurs comme Georges Gonthier, ou Thomas Hales qui s'attache à vérifier la conjecture de Kepler sur l'empilement de sphères le plus compact, commencent à comprendre comment on peut « vérifier » le résultat d'un calcul. Leurs méthodes donnent une norme de qualité très élevée, fournissant une certitude presque absolue que les résultats sont corrects.

Utiliser un ordinateur permet-il de « comprendre » un théorème ?
Lorsqu'une preuve repose sur le résultat d'un gros calcul informatique, on peut constater que ce résultat est juste. Mais si l'on n'a pas d'argument pour expliquer pourquoi le calcul a fonctionné, on ne peut pas dire qu'on a vraiment compris ce qu'il se passe. Il n'est pas sûr que l'ordinateur aide beaucoup à « comprendre ».

Son utilisation annonce-t-elle une nouvelle ère pour les mathématiques ?
Dans le domaine des mathématiques pures, la plupart des démonstrations sont encore faites à l'aide d'un simple papier et d'un crayon. La communauté commence toutefois à accepter le rôle que l'ordinateur peut et devrait jouer. De plus, on entrevoit des connexions profondes entre la logique sous-jacente aux preuves assistées par ordinateur et certaines théories mathématiques. Ces connexions pourraient amener à reformuler les mathématiques sur des bases nouvelles.

PROPOS RECUEILLIS PAR PHILIPPE PAJOT

* Philosophe des mathématiques à l'université Carnegie-Mellon, Pittsburgh (Pennsylvanie)

proposé par le Britannique Francis Guthrie en 1852. Pour la première fois, les mathématiciens utilisent l'ordinateur de manière intensive dans les parties les plus délicates de la démonstration. La controverse est lancée : peut-on faire confiance à une preuve qui comporte des programmes informatiques dont les mathématiciens sont incapables de vérifier l'exactitude ?

170 000 lignes de code

C'est Georges Gonthier qui, en 2005, met fin au doute. Il utilise, pour apporter la preuve de ce théorème, de nouveaux outils formels, appelés assistants de preuve. « *Ils guident l'informaticien qui doit formaliser en programme, pas à pas, toutes les étapes de la démonstration mathématique* », explique-t-il. Le système interprète ensuite la preuve formelle et vérifie sa cohérence logique. A condition que l'on soit sûr qu'il fonctionne correctement – ce qui est contrôlé indépendamment –, la preuve est validée.

C'est ce même outil qu'a utilisé l'équipe de Georges Gonthier pour le théorème de Feit-Thompson. Son efficacité repose sur une découverte mûrie à partir des années 1950 : la correspondance preuve mathématique-programme informatique. « *Ils ont la même structure logique. Les informaticiens ont donc pu concevoir des langages qui sont à la fois des logiques et des langages de programmation* », explique Hugo Herbelin, chercheur à l'Inria. Tel le langage Coq, qui a servi à vérifier le théorème des quatre couleurs, puis celui de Feit-Thompson.

Mais si les assistants de preuves sont tellement efficaces, pourquoi a-t-il fallu près de six ans pour venir à bout de ce dernier ? D'abord parce qu'il s'agit d'un gros théorème (250 pages), mais surtout parce que, dans les 170 000 lignes de code informatique nécessaires pour le prouver, seulement 20 % concernent le théorème proprement dit. Les 80 % restants traduisent toutes les règles d'algèbre nécessaires à la démonstration. « *Georges Gonthier est l'expert typique pour ce genre de travail. Non seulement c'est un excellent mathématicien, mais il a un côté un peu hacker* », précise Hugo Herbelin.

A quand l'adoption massive des assistants de preuve ? « *Dans les dix prochaines années, on devrait voir de plus en plus de mathématiciens tenter l'expérience. Mais pour que les résultats publiés soient systématiquement vérifiés, il faudra encore une vingtaine d'années au moins* », estime Hugo Herbelin. Première étape en cours, la « mise en boîte » de toutes les démonstrations correspondant aux trois années de licence de mathématique. Si les étudiants se mettent à utiliser ces outils, nul doute que les chercheurs qu'ils deviendront s'y mettront aussi. Une nouvelle ère pour la vérification des mathématiques !

PHILIPPE PAJOT

1. Vérités premières qui ne se contredisent pas.

Le site du CNRS sur la vérification du théorème de Feit-Thompson : http://images.math.cnrs.fr/Coq-et-caracteres.html

UN THÉORÈME LONG ET TECHNIQUE

Pierre angulaire de l'algèbre du XX^e^ siècle, le théorème de Feit-Thompson, ou théorème de l'ordre impair, stipule que tout groupe (une structure mathématique qui a un lien avec la notion de symétrie) possédant un nombre impair d'éléments se réduit en facteurs qui sont des nombres premiers. Il a permis de lancer ce monumental programme qu'est la classification des groupes finis. La démonstration est d'une longueur et d'une technicité inhabituelles, raison pour laquelle des doutes ont longtemps subsisté sur sa validité.

Mathématiques

L'intrigante répartition des nombres premiers

Coup sur coup, deux découvertes importantes, aux Etats-Unis et en France, viennent de lever un coin de voile sur ce domaine fascinant des mathématiques.

ENCORE À RÉSOUDRE...

Conjecture de Goldbach binaire : tout nombre pair peut s'écrire comme la somme de deux nombres premiers.

Conjecture des nombres premiers jumeaux : il existe une infinité de paires de nombres premiers dont la différence est égale à deux.

Conjecture d'Elliott-Halberstam sur la répartition des nombres premiers dans les suites arithmétiques.

Conjecture de Riemann sur les zéros de la fonction de Riemann (fonction d'une variable complexe). Sa résolution, dotée d'un prix d'un million de dollars, améliorerait notre connaissance de la répartition des nombres premiers.

Yitang Zhang était, jusqu'il y a peu, un quasi-inconnu. Mais cela risque de changer… Ce mathématicien d'origine chinoise, enseignant à l'université du New Hampshire (Etats-Unis), a réalisé au mois de mai une découverte essentielle en théorie des nombres. Et cela sur un territoire particulièrement magique – celui des nombres premiers. Il a prouvé qu'il en existait une infinité séparés au plus par 70 millions d'unités. D'abord dubitative, la communauté scientifique est bientôt formelle : il s'agit d'une percée majeure, à laquelle personne ne s'attendait.

Pourquoi cette excitation ? Parce que ce résultat ouvre la voie à la démonstration d'une conjecture qui résiste depuis des siècles à tous les efforts : celle dite « des nombres premiers jumeaux », selon laquelle il existerait une infinité de nombres premiers distants de deux unités, comme 11 et 13 ou 59 et 61.

La répartition des nombres premiers reste le plus grand mystère de l'arithmétique. Par définition uniquement divisibles par 1 et par eux-mêmes (2, 3, 5, 7, 11, 13, etc.), ces nombres représentent les briques élémentaires des entiers, puisqu'ils sont « insécables » et que l'on obtient tous les autres entiers en les multipliant entre eux. Dès l'Antiquité, Euclide démontre qu'il en existe une infinité. Mais lorsqu'on examine leur densité, c'est-à-dire la manière dont ils se répartissent en tendant vers l'infini, on s'aperçoit qu'ils se raréfient. Et les paires de « jumeaux » plus encore. D'où l'impact du résultat de Yitang Zhang : il prouve, pour la première fois, qu'il y a un écart fini entre une infinité de nombres premiers consécutifs. « *Bien sûr, 70 millions est beaucoup plus grand que 2, mais ce résultat a pris tout le monde par surprise, car on pensait impossible de le prouver avec les techniques habituelles* », explique Philippe Michel, théoricien des nombres à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Les techniques classiques en question – méthodes de crible, théories des sommes d'exponentielles notamment – sont tout de même le fruit de plus d'un siècle de progrès en théorie analytique des nombres. La grande force de Yitang Zhang a été de les combiner.

Projet collaboratif

Une fois la surprise passée, les mathématiciens ont compris que de nombreuses améliorations étaient possibles. La preuve est décomposable en différents modules, de

DR

« Ce résultat a pris tout le monde par surprise, car on pensait impossible de le prouver avec les techniques habituelles »

Philippe Michel

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

sorte que l'on peut optimiser chacun pour trouver un écart plus petit que 70 millions. Le 4 juin 2013, Terence Tao, de l'université de Californie à Los Angeles, lance un projet collaboratif avec cet objectif. Depuis, on découvre presque quotidiennement sur son site (1) les contributions de dizaines de spécialistes. « *C'est formidable de voir les mathématiques en train de se faire*, s'enthousiasme Philippe Michel, qui participe à cet effort commun. *En un mois, nous avons beaucoup progressé, mais nous avons aussi eu l'occasion de lire les remarques des mathématiciens, leurs progrès et rétractations.* »

Quant à savoir quelles sont les limites de la méthode, Terence Tao estime sur son blog que les « *améliorations faciles* » ont d'ores et déjà été réalisées et qu'il sera désormais délicat d'aller bien en dessous de 4680, dernier écart trouvé. Le ralentissement visible du rythme des progrès tendrait à lui donner raison.

Hasard du calendrier qui témoigne de la vigueur du domaine, presque au moment même où le papier de Zhang était accepté pour publication, un autre résultat important lié à la répartition des nombres premiers était publié : Harald Helfgott, chercheur péruvien du CNRS qui travaille à l'Ecole normale supérieure de Paris, annonçait que tout nombre impair à partir de 5 s'écrit comme la somme de trois nombres premiers. C'est la démonstration de la conjecture de Goldbach ternaire. La conjecture de Goldbach binaire – toute nombre pair est la somme de deux nombres premiers – reste, à l'instar de celle des nombres premiers jumeaux, inaccessible par les méthodes utilisées jusqu'ici *(lire p. 24)*. Mais l'exhortation de Zhang selon laquelle « *l'important est de continuer à penser* » pourrait stimuler beaucoup de mathématiciens.

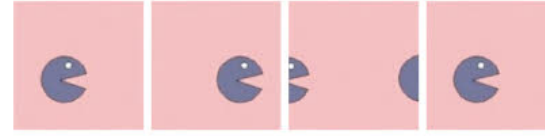
PHILIPPE PAJOT

(1)http://michaelnielsen.org/polymath1/index.php?title=Bounded_gaps_between_primes)

Géométrie

LE TORE PLAT DILATÉ PAR L'INFORMATIQUE

TOUT LE MONDE CONNAÎT, sans le savoir, ce que les mathématiciens baptisent « tore de révolution » : une surface ayant la forme d'une chambre à air. Mais le tore peut aussi être plat. Il s'agit alors d'un carré virtuel dont les bords opposés s'assemblent, comme dans le jeu vidéo Pac-Man : un personnage qui disparaît d'un côté réapparaît aussitôt de l'autre. En collant entre eux les bords opposés de ce tore plat, on obtient sa représentation tridimensionnelle, un tore de révolution. Seulement, sur cette représentation, les distances sont déformées : deux segments de même longueur sur le tore plat ne le sont plus après recollage. Existe-t-il un moyen de le représenter en trois dimensions en respectant les distances? C'est le génial John Nash, futur prix Nobel d'économie, qui montre en 1953 que l'on peut « plonger » certains espaces – dont le tore est un cas particulier – dans d'autres dimensions sans modifier les distances : ces représentations, annonce-t-il, sont incroyablement nombreuses, mais leur aspect doit être à la fois lisse et grumeleux… Pour visualiser ce paradoxe, il faudra que Mikhaïl Gromov, autre figure des mathématiques, invente en 1994 une technique systématisant le procédé de construction de ces objets. En 2012, en simplifiant les méthodes et à l'aide de puissants calculateurs, une équipe de chercheurs de Lyon et Grenoble a enfin pu représenter ce tore plat, objet hybride entre fractale et surface lisse. Un bel exemple de collaboration entre informatique et mathématiques fondamentales. **P. P.**

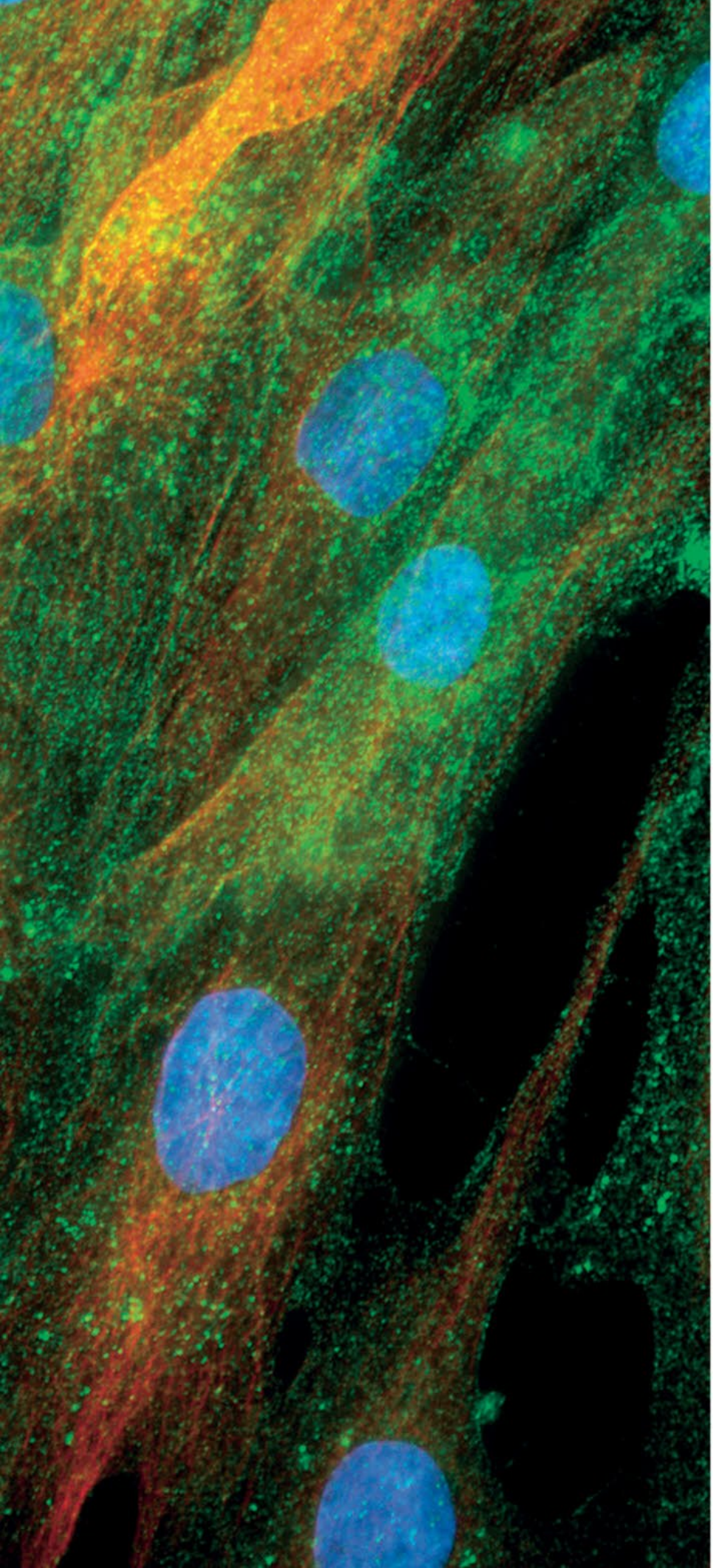


Tore plat, dans lequel un personnage qui disparaît à droite réapparaît aussitôt à gauche, et sa représentation en 3D.

V. BORRELLI, S. JABRANE, F. LAZARUS, D. ROHMER, B. THIBERT

Cellules souches obtenues à partir de tissu adipeux (en bleu, le noyau). Dites pluripotentes, elles sont capables de se différencier en n'importe quel type de cellule de l'organisme.

CELLULES SOUCHES : LE CORPS RÉPARÉ ?



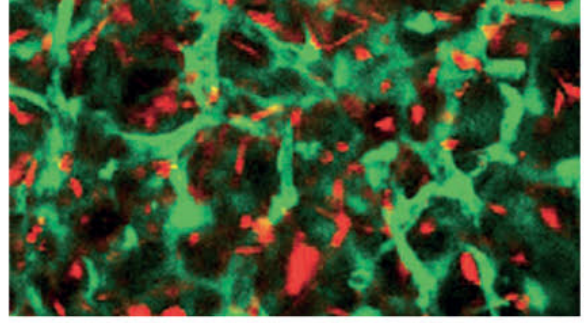
RICCARDO CASSIANI-INGONI /SPL/PHANIE

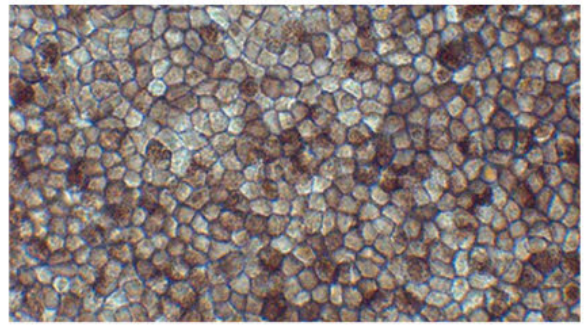
Pourra-t-on un jour reconstruire, grâce aux cellules souches, les organes lésés de notre corps ? Les essais cliniques démarrent à peine, mais certains rêvent déjà d'éternelle jeunesse.

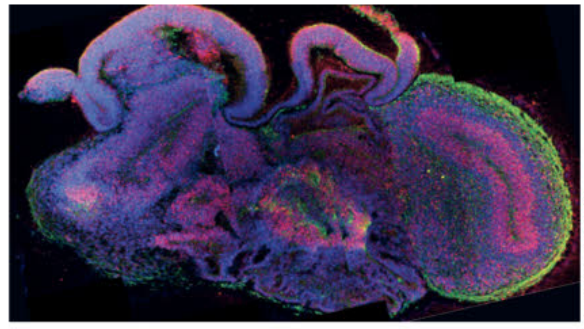
Un espoir pour les personnes qui souffrent de la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge) ? Il est trop tôt pour le dire. Mais un essai clinique original, proposé par l'équipe de Masayo Takahashi, du Riken, grand organisme de recherche japonais, devrait démarrer d'ici l'été 2014. Objectif : soigner cette affection de la rétine qui fait perdre progressivement la vision centrale, et qui touche en France plus d'un million de personnes. Des médicaments existent déjà, qui peuvent stabiliser la maladie. Mais cette fois, la stratégie consiste à « réparer » les yeux des patients en y introduisant des cellules souches pluripotentes *(lire « Trois types de cellules » p. 29)*. L'essai visera, dans un premier temps, à démontrer l'innocuité du traitement. L'amélioration de la vision des patients fera l'objet d'expérimentations ultérieures.

Œil, cœur, moelle osseuse, cerveau…

Réparer l'organisme lésé par les accidents, la maladie, ou le vieillissement… Tel est l'objectif d'une médecine d'un nouveau genre, dite « régénératrice », dont une branche se fonde sur des cellules particulières de notre organisme : les cellules souches, présentes dès les premiers jours de la conception. Entre le cinquième et le septième jour après la fécondation, l'embryon contient une centaine de ces cellules, à l'origine de tous les tissus de l'être humain. Par la suite, elles se ●●●







TAKANORI TAKEBE ET AL./NATURE

RIKEN

MADELINE A. LANCASTER

DES CELLULES SOUCHES AUX TISSUS ORGANIQUES

En haut, génération de bourgeons de foie humain à partir de plusieurs types de cellules souches (en vert et rouge). Au centre, cellules épithéliales pigmentées de la rétine. En bas, « mini-cerveau » développé à partir de cellules souches différenciées en plusieurs sortes de tissu cérébral.

●●● « différencient », c'est-à-dire qu'elles se spécialisent pour former chacun des organes. Depuis une quinzaine d'années, on produit en laboratoire des cellules toutes neuves à partir des cellules souches embryonnaires (CSE) humaines. Avec l'espoir qu'elles puissent réparer l'œil déficient, la moelle osseuse sectionnée, le cœur lésé après un infarctus ou le cerveau endommagé par un accident vasculaire cérébral, en allant coloniser la partie détruite de l'organe.

Rajeunir des cellules de centenaires

Depuis peu, la médecine régénératrice explore également une autre stratégie qui repose sur deux découvertes majeures. Réalisées par le Britannique John Gurdon en 1962 et par le Japonais Shinya Yamanaka en 2006, elles ont valu aux deux hommes un prix Nobel en 2012. Gurdon est parvenu, par clonage, à montrer que la différenciation des cellules est réversible, ce que personne ne croyait possible. Yamanaka a, quant à lui, réussi à « reprogrammer » des cellules adultes en leur insérant quatre gènes particuliers pour les faire redevenir cellules souches. Une méthode beaucoup moins lourde que le clonage, qui ouvre la porte aux thérapies cellulaires. Ces cellules sont désormais connues sous le nom de « cellules souches pluripotentes induites » (CSPi). Pour leur faire fabriquer les cellules constitutives de l'organe à réparer, il faut, comme d'ailleurs pour les CSE, les mettre en contact dans leurs boîtes de culture avec certaines molécules bien déterminées, qui orientent la différenciation.

Sur le papier, rien de plus simple. En pratique, les obstacles sont nombreux. Par exemple, jusqu'à récemment, les cellules d'individus âgés ne se prêtaient pas à la reprogrammation. Car elles sont « sénescentes », c'est-à-dire que leur vieillissement s'accompagne d'une dégradation progressive et inéluctable de fonctions, notamment immunitaires. En 2011, toutefois, l'équipe de Jean-Marc Lemaître, de l'Institut de génomique fonctionnelle de Montpellier (Inserm/CNRS/université de Montpellier), a révélé qu'elle avait surmonté cet obstacle. En ajoutant deux gènes supplémentaires aux quatre nécessaires pour produire des CSPi, elle a réussi à reprogrammer des cellules de personnes centenaires. Ces travaux ont introduit une nouvelle donnée dans la médecine régénératrice : celle du rajeunissement des cellules.

De là à rêver de remplacer régulièrement ses organes tout au long de la vie, il n'y a qu'un pas… Sur cette ligne, l'équipe de Takanori Takebe, de l'université de Yokohama au Japon, a rendu public en juillet dernier un résultat spectaculaire. Elle est parvenue, à partir de CSPi humaines, à créer chez des souris un organe tridimensionnel de quelques millimètres équivalent à un foie humain fonctionnel, qui a suppléé à un foie défaillant chez ces animaux. « *Dans le futur, c'est la perspective de reconstruire des organes humains complets*, explique Jean-Marc Lemaître. *Soit dans la boîte de culture, à partir d'une matrice artificielle ou de l'enveloppe externe d'un organe naturel qui sera recolonisée par ces cellules souches. Soit en faisant produire un organe humain par un animal, un porc par exemple, souvent utilisé comme modèle proche de l'humain en laboratoire.* »

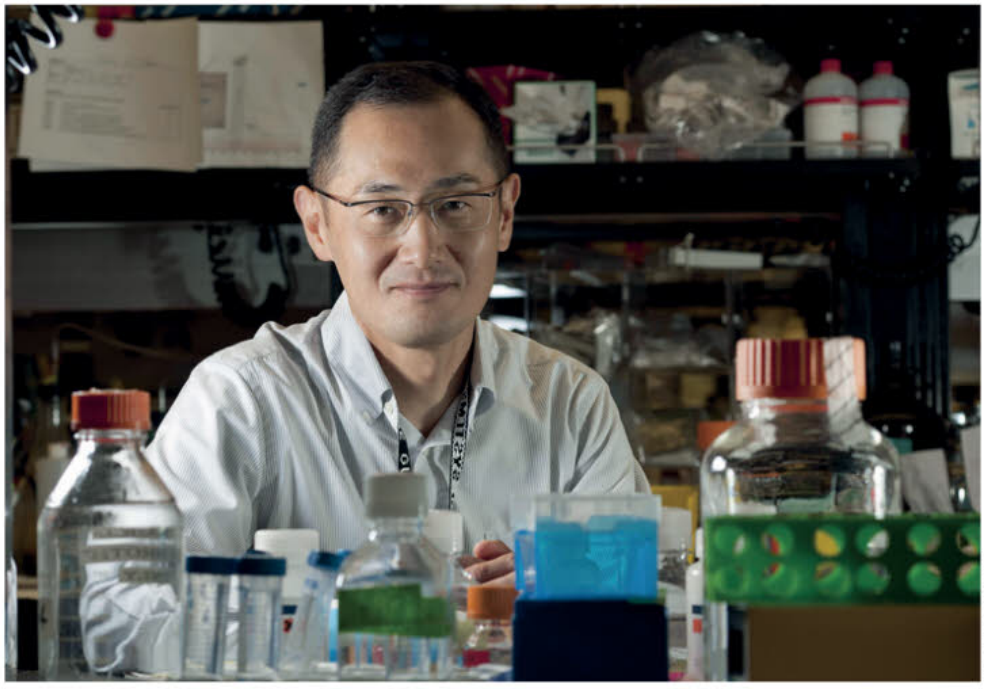
Mais du laboratoire aux essais cliniques, le chemin est toujours long. Il l'est encore plus pour les CSE, car elles soulèvent des problèmes éthiques liés au statut de l'embryon. Partout dans le monde, la recherche est très encadrée. En France, elle était jusqu'à peu « *interdite sauf dérogation* ». La nouvelle loi de bioéthique adoptée par l'Assemblée nationale le 16 juillet dernier la déclare « *autorisée sous conditions* ». Des conditions très strictes : les cellules doivent provenir d'embryons surnuméraires issus de fécondations *in vitro*, qui ne font l'objet d'aucun projet parental. Le consentement des donneurs est requis, et de solides motivations scientifiques sont demandées.

Une quarantaine d'équipes ont reçu, dans notre pays, l'autorisation de l'Agence de biomédecine d'utiliser des CSE en laboratoire. Cela ne signifie pas que ces études conduiront à des essais cliniques : il n'y a eu à ce jour qu'un seul essai dans le monde avec des CSE, mené en 2011-2012 aux États-Unis, portant sur la DMLA et sur une autre pathologie de la rétine, la maladie de Stargardt. « *Les résultats préliminaires sont intéressants, car des cellules greffées se sont bien fixées au fond de l'œil. Mais l'essai porte sur une dizaine de patients, ce qui est trop peu pour conclure à l'amélioration de la vision* », commente Jean-Marc Lemaître. Le suivi de ces patients est toujours en cours.

Quant aux CSPi, « *elles ne posent pas de problème éthique à priori,*

Nicole Le Douarin, *Les Cellules souches, porteuses d'immortalité*, Odile Jacob, 2007

« Dans le futur, on pourrait faire produire un organe humain par un animal, un porc par exemple » Michel Pucéat



REX FEATURES/REX/SIPA

Shinya Yamanaka a été le premier à reprogrammer des cellules adultes pour obtenir des cellules souches.

sous réserve que leur effet sur l'organisme soit bien évalué, car elles sont manipulées génétiquement », souligne Anne Cambon-Thomsen, qui dirige la plateforme Génétique et société (Inserm/université Paul-Sabatier de Toulouse). C'est d'ailleurs un des arguments des opposants à la loi de bioéthique : les CSPi existent, il est donc inutile de faire de la recherche sur les cellules souches embryonnaires. *« Cet argument ne tient pas, car on en sait trop peu*, réplique la chercheuse toulousaine. *Il faut comparer les deux voies. »* L'avenir dira quel type de cellule souche se prête à quel type d'application.

Le business de la sénescence

« Quinze ans après la découverte des cellules souches, nous n'avons fait qu'identifier les blocages techniques, constate Michel Pucéat, de l'unité 633 de l'Inserm/université Paris-Descartes à Evry (Essonne), qui a notamment travaillé sur des CSE destinées à réparer le muscle cardiaque après un infarctus. *Il en reste de sérieux chez l'homme : on ne sait pas encore implanter les cellules souches de manière efficace, et il faut permettre à l'organisme de les tolérer par des traitements antirejet adaptés. »* Nouvelle voie explorée : les fixer sur un « patch » appliqué sur l'organe à réparer, afin qu'elles migrent vers la région lésée. Quant aux traitements antirejet, ils sont nécessaires pour les CSE mais aussi pour les CSPi, puisqu'elles ont été manipulées et que l'organisme peut les considérer comme étrangères.

Toutes ces réserves n'empêchent pas le business de battre déjà son plein, à coups de promesses mirifiques. En France, la société Cellectis vient de lancer une offre baptisée « Scéil », qui propose à ses clients de fabriquer leurs CSPi et de les stocker dans une banque afin de les réutiliser plus tard en cas de besoin. Allant encore plus loin, le mouvement transhumaniste entend mettre tous les moyens de la technologie au service du corps humain. Ses promoteurs souhaitent tendre vers une *« sénescence minimum »*. Ils financent des recherches de génétique et de thérapie cellulaire pour, notamment, *« rajeunir le système immunitaire »* ou *« supprimer les cellules défectueuses ». « Où s'arrête la médecine, où commence la performance ? Que signifie vieillir ? On n'entend pas assez les philosophes se poser ces questions aujourd'hui »*, remarque Anne Cambon-Thomsen. Des questions qu'il sera difficile d'éviter si les cellules souches tiennent leurs promesses.

JEAN-FRANÇOIS HAÏT

TROIS TYPES DE CELLULES

TOTIPOTENTES
Cellules de l'embryon jusqu'à 4 jours. Les seules capables de produire un individu complet.

PLURIPOTENTES
Présentes dans l'embryon entre le 5e et le 7e jour. Capables de se différencier en tous les types de cellules de l'organisme. En médecine régénératrice, elles peuvent être utilisées telles quelles (CSE) ou produites à partir de cellules adultes reprogrammées (CSPi).

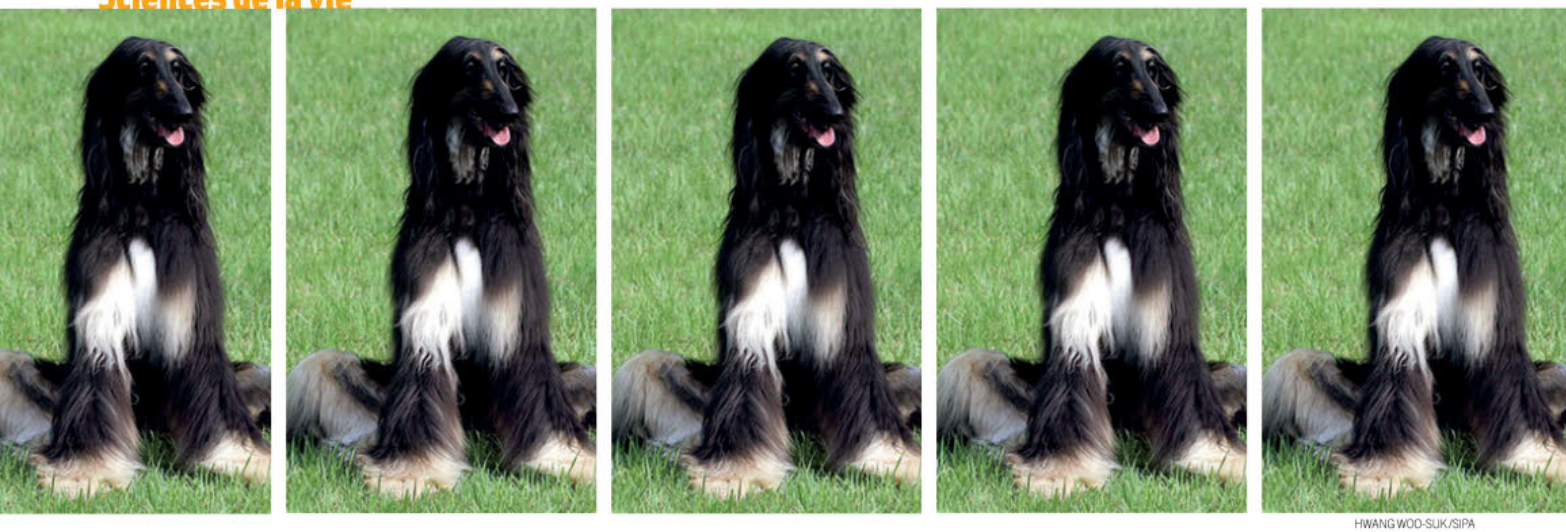
MULTIPOTENTES
Présentes tout au long de la vie, et capables de se différencier en certains types (par exemple, les cellules de moelle osseuse donnent les cellules du sang).

Bientôt, la vie créée en laboratoire ?

Génie ou apprenti-sorcier ? Le 20 mai 2010, Craig Venter, généticien américain déjà célèbre pour avoir largement contribué au séquençage du génome humain, révèle qu'il a réussi à fabriquer avec son équipe la première bactérie synthétique. Autrement dit, un organisme dont le génome a été construit artificiellement, brique par brique. Certes, ce génome artificiel est la copie de celui d'une bactérie bien réelle, *Mycoplasma mycoides*. Mais il s'agit tout de même d'une prouesse technologique, car on n'avait jamais réussi à fabriquer des séquences d'ADN aussi longues. En perspective : la conception de bactéries sur mesure destinées à produire des composés chimiques d'intérêt industriel ou médical. Mais les détracteurs de Venter lui reprochent d'avoir ouvert la porte à la fabrication d'organismes au génome totalement nouveau, potentiellement pathogènes et qui pourraient se disséminer dans la nature ou être détournés à des fins terroristes. En réalité, les risques liés à cette « biologie de synthèse » sont encore mal évalués car la discipline est toute récente.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

Première bactérie synthétique *Microplasma mycoides* vue au microscope électronique.



HWANG WOO-SUK/SIPA

Clonage

Pas de réplique pour l'être humain !

Tabou chez l'homme, le clonage est couramment pratiqué pour les animaux d'élevage ou de concours. Certains rêvent, grâce à lui, de voir des mammouths fouler de nouveau la Terre...

Fera-t-on bientôt revivre des animaux disparus ? En mai dernier, un énième mammouth était découvert congelé dans le permafrost sibérien *(lire* S. et A. *n° 797, juillet 2013)*. La parfaite conservation de son sang a réveillé l'ambition de ranimer cette espèce… par clonage. S'il est hautement improbable de retrouver des cellules vivantes, et si la faible quantité d'ADN préservé risque d'être en mauvais état, un partenariat a pourtant été signé entre l'université russe de Iakoutsk, dont relèvent les membres de l'expédition, et le Sud-Coréen Hwang Woo-suk, scientifique extrêmement controversé (1).

Jusque-là, le clonage n'avait concerné que des animaux vivants. En 1996, la naissance de Dolly la brebis inaugurait une longue série de clones de quadrupèdes domestiques, de laboratoire ou de ferme : souris (1997), vache (1998), cochon (2002), cheval et chat (2002), chien (2005) ou coyote (2008). Le mode opératoire, le SCNT (Somatic Cell Nuclear Transfer) ou transfert d'un noyau de cellule somatique (2), est connu depuis longtemps. En 1958, déjà, le Britannique John Gurdon (prix Nobel 2012) était parvenu, avec son équipe, à cloner ainsi une grenouille. La technique consiste à prélever une cellule adulte d'un individu, de peau par exemple, ou, comme l'ont montré en août les Japonais de l'institut Riken, de sang. Puis à introduire le noyau de cette cellule dans un ovocyte vidé de son contenu. On donne ensuite une impulsion électrique… Avec un peu de chance, l'ovocyte « fécondé » se divise. Dernière étape pour aboutir à une naissance : implanter l'œuf dans l'utérus d'une mère porteuse.

Aujourd'hui, le clonage par SCNT se développe chez les propriétaires accablés par la perte de leur animal domestique, dans l'élevage du bétail ou le milieu hippique, pour perpétuer la mémoire génétique des cracks. Depuis 2012, les clones sont ainsi acceptés dans les concours internationaux.

Il se développe aujourd'hui chez les propriétaires accablés par la perte de leur animal domestique

Mais la technique est toujours en cours de perfectionnement. Il s'agit notamment de résoudre le problème du piètre rendement de l'opération – moins de 10 % des transferts réussissent –, ainsi que celui de la plus faible longévité des clones, liée au recours à un ADN « déjà vieux ».

Et le clonage humain ? On en est loin, car il se heurte à un interdit planétaire posé en 2005, au nom de l'éthique, par une résolution de l'ONU. De ce fait, aucune recherche publique ne peut le cautionner. Et ce, même s'il ne s'agit que de clonage thérapeutique, visant à obtenir des cellules souches embryonnaires humaines (CSEh) *(lire pp. 26-29)*. C'est ainsi sur des fonds privés qu'ont été menés les travaux de l'équipe américaine de Shoukhrat Mitalipov (Oregon Health & Science University) parus dans la revue *Cell* en mai dernier. Ils portent sur l'obtention de CSEh par clonage... pudiquement dénommé SCNT ! Des résultats très discutés, mais qui pourraient constituer la première tentative réussie de clonage humain. Huit ans après les travaux du sulfureux professeur Hwang. Celui-là même qui, réhabilité dans son pays, s'est reconverti dans le clonage de mammouth !

CLARA DELPAS

Le lévrier afghan ci-dessus est le premier chien à avoir été cloné avec succès. C'était en 2005, en Corée du Sud.

1. Ses travaux sur le clonage d'embryon humain, publiés dans *Science* en mai 2005, ont été invalidés, notamment en raison de résultats falsifiés. En 2009, il écopera de deux ans de prison avec sursis.
2. Toutes les cellules à l'exception des cellules sexuelles.

Greffes : de la tête aux pieds

Organes bioartificiels, cloches à greffons, innovations chirurgicales... Les transplantations ont fait des progrès spectaculaires dans tous les domaines.

Le visage

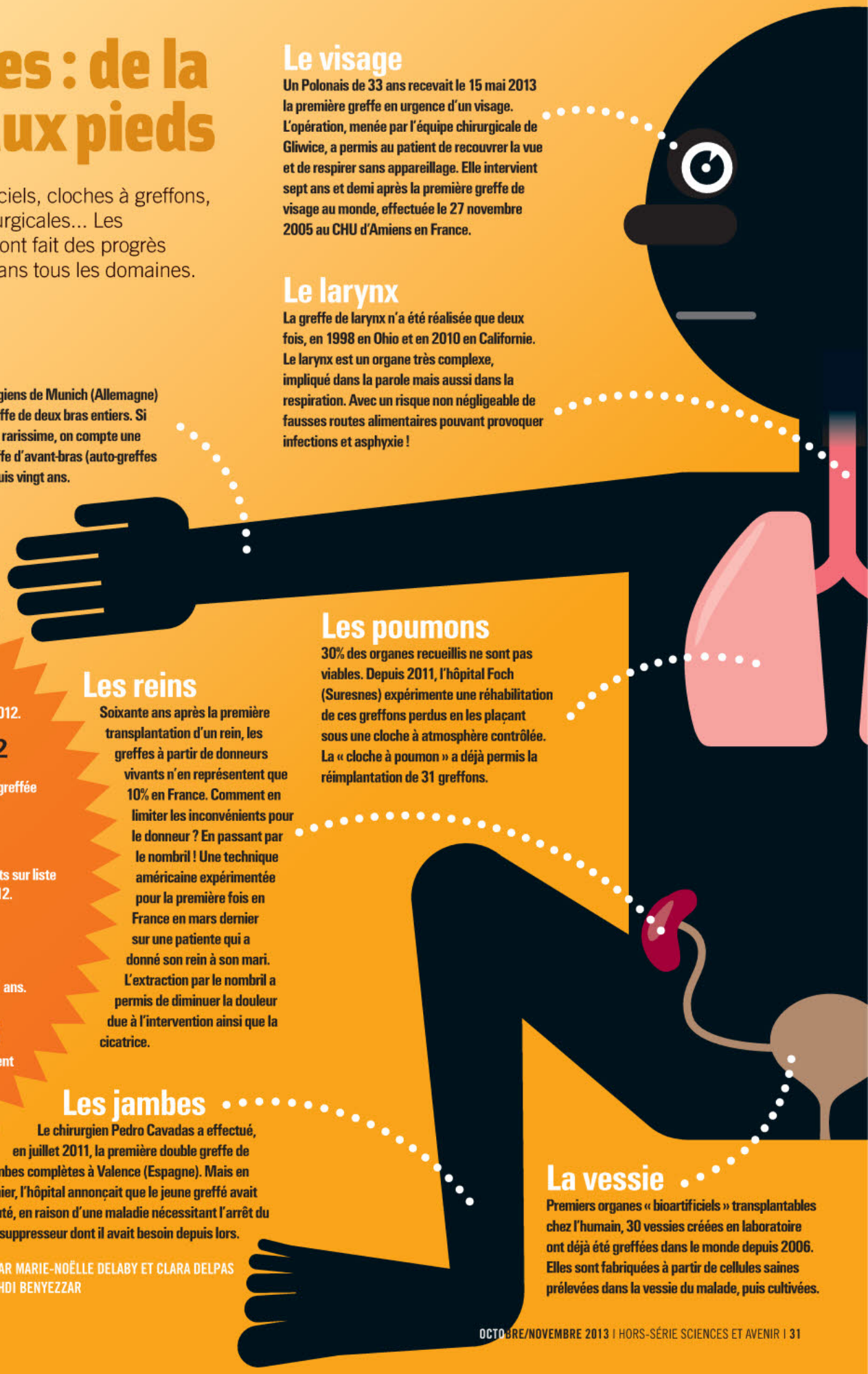
Un Polonais de 33 ans recevait le 15 mai 2013 la première greffe en urgence d'un visage. L'opération, menée par l'équipe chirurgicale de Gliwice, a permis au patient de recouvrer la vue et de respirer sans appareillage. Elle intervient sept ans et demi après la première greffe de visage au monde, effectuée le 27 novembre 2005 au CHU d'Amiens en France.

Le larynx

La greffe de larynx n'a été réalisée que deux fois, en 1998 en Ohio et en 2010 en Californie. Le larynx est un organe très complexe, impliqué dans la parole mais aussi dans la respiration. Avec un risque non négligeable de fausses routes alimentaires pouvant provoquer infections et asphyxie !

Les bras

En juillet 2008, des chirurgiens de Munich (Allemagne) ont réalisé la première greffe de deux bras entiers. Si ce type d'opérations reste rarissime, on compte une soixantaine de cas de greffe d'avant-bras (auto-greffes comprises) en France depuis vingt ans.



5 023
Nombre de greffes pratiquées en France en 2012.

29,6 m²
La surface totale de peau greffée en France en 2012.

16 627
Nombre de malades inscrits sur liste d'attente en France en 2012.

+ 42%
Augmentation du nombre de greffes en France en 21 ans.

50 726
Français vivent actuellement avec un greffon fonctionnel.

Les reins

Soixante ans après la première transplantation d'un rein, les greffes à partir de donneurs vivants n'en représentent que 10% en France. Comment en limiter les inconvénients pour le donneur ? En passant par le nombril ! Une technique américaine expérimentée pour la première fois en France en mars dernier sur une patiente qui a donné son rein à son mari. L'extraction par le nombril a permis de diminuer la douleur due à l'intervention ainsi que la cicatrice.

Les poumons

30% des organes recueillis ne sont pas viables. Depuis 2011, l'hôpital Foch (Suresnes) expérimente une réhabilitation de ces greffons perdus en les plaçant sous une cloche à atmosphère contrôlée. La « cloche à poumon » a déjà permis la réimplantation de 31 greffons.

Les jambes

Le chirurgien Pedro Cavadas a effectué, en juillet 2011, la première double greffe de jambes complètes à Valence (Espagne). Mais en juin dernier, l'hôpital annonçait que le jeune greffé avait dû être ré-amputé, en raison d'une maladie nécessitant l'arrêt du traitement immunosuppresseur dont il avait besoin depuis lors.

La vessie

Premiers organes « bioartificiels » transplantables chez l'humain, 30 vessies créées en laboratoire ont déjà été greffées dans le monde depuis 2006. Elles sont fabriquées à partir de cellules saines prélevées dans la vessie du malade, puis cultivées.

PAGES RÉALISÉES PAR MARIE-NOËLLE DELABY ET CLARA DELPAS
INFOGRAPHIES : MEHDI BENYEZZAR

Du nouveau dans notre corps

Une saveur méconnue, des neurones inattendus, de nouvelles cellules rétiniennes... Un petit point s'impose !

700

neurones se forment chaque jour dans notre cerveau (*Cell*, 2013), plus précisément dans l'hippocampe. On a longtemps pensé que le nombre de nos neurones n'était voué qu'à diminuer avec le vieillissement et que leurs connexions étaient bien établies : dans les années 1980, on a découvert que le cerveau était capable de réorganiser ses réseaux. En outre, on sait qu'il fabrique de nouveaux neurones : des cellules souches y ont été découvertes (*PLOS*, 2012).

6

saveurs pour notre palais : salé, sucré, amer, acide, umami (goût de bouillon de viande) et... gras. En 2011, des chercheurs de St Louis (Missouri) ont indiqué que nous posséderions un système de détection des lipides allant des bourgeons du goût aux centres nerveux. Bref, des récepteurs du gras, en passe de devenir une saveur à part entière.

3

types de cellules dans la rétine : les cônes, les bâtonnets et les ipRGC, ou cellules rétiniennes ganglionnaires intrinsèquement photosensibles (*Science*, 2002). Ces dernières contiennent de la mélanopsine, un pigment sensible au spectre de la lumière bleue qui permet au cerveau de réguler le rythme circadien de l'organisme ainsi que son système de vigilance.

10^9

capillaires sanguins (diamètre : 10 microns) pour acheminer les globules rouges un par un aux cellules. Le tout, sans coaguler ! Et ce, grâce à l'endothélium, une couche de 0,1 micron d'épaisseur qui tapisse l'intérieur de tous les vaisseaux. Parsemé de capteurs sensibles au frottement, activés par l'écoulement du sang, l'endothélium produit du monoxyde d'azote (NO), un gaz vasodilatateur.

3

types de flore intestinale (ou microbiote) seulement pour toute l'espèce humaine. Le séquençage de 3,3 millions de gènes des quelque 10 000 milliards de bactéries présentes dans les intestins chez l'homme a permis au programme international MetaHit de distinguer ces trois entérotypes, nommés selon l'espèce bactérienne qui y prédomine, bactéroides, *Prevotella* ou *Ruminococcus* (*Nature*, 2011).

12

Le nombre d'ancêtres communs sur les quinze derniers siècles que partagent deux Européens d'aujourd'hui... Ces ancêtres seraient une centaine si l'on remonte à 2500 ans.

10 000

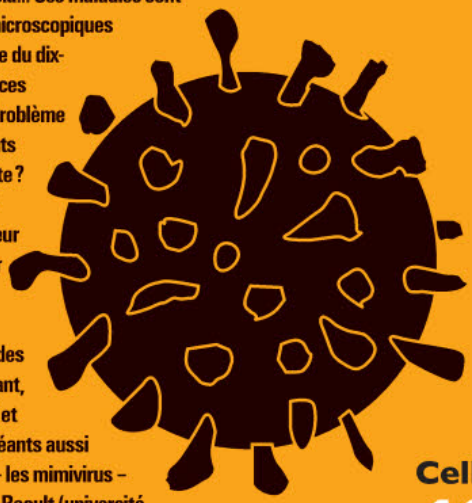
Le nombre de maladies génétiques causées chez l'homme par des anomalies de l'ADN. 7000 gènes responsables de maladies ont déjà été identifiés, et 2000 localisés.

Nos meilleurs ennemis

On les a longtemps traités d'envahisseurs. Ils nous infectent, nous rendent parfois malades, mais sans eux, pas de vie !

Virus

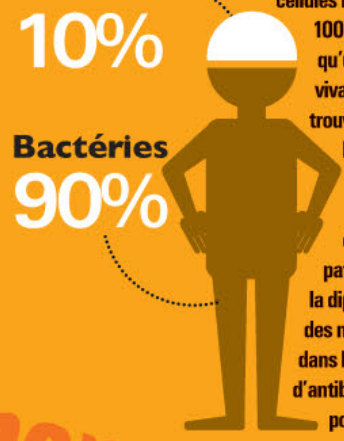
Variole, sida, grippe, Ebola... Ces maladies sont dues à des virus. Pour microscopiques qu'elles soient (de l'ordre du dix-millième de millimètre), ces entités posent un gros problème à la science : êtres vivants ou vulgaire matière inerte ? Leur taille ne plaide pas pour eux, pas plus que leur incapacité à se répliquer par eux-mêmes puisqu'ils ont besoin, pour ce faire, d'infecter des cellules vivantes. Pourtant, depuis les années 2000 et la découverte de virus géants aussi gros que des bactéries – les mimivirus – par l'équipe du Pr Didier Raoult (université de Marseille), le débat sur leur nature a été totalement relancé. D'autant que les virus auraient pu contribuer à l'apparition de la vie, voilà 3,5 milliards d'années. Sans virus, pas de vie et pas d'être humain. En effet, c'est grâce à la présence d'un virus intégré dans notre génome que le fœtus n'est pas rejeté par le corps de la mère ! Le nombre et la diversité des virus sont totalement impossibles à estimer.



Parasites

Le mot ne désigne pas une entité biologique spécifique. Un parasite, c'est un animal qui vit aux dépens d'un autre. On en trouve beaucoup chez les insectes mais également chez les poissons. L'être humain connaît au moins un parasite célèbre : le ténia, également nommé ver solitaire, qui peut atteindre plusieurs mètres de long. Mais une cinquantaine d'autres maladies parasitaires humaines existent, la plupart graves et difficiles à éradiquer. L'une des plus répandues est le paludisme, due à un protozoaire parasite des moustiques. Citons également la gale (causée par un acarien) et la leishmaniose (due à des trypanosomes).

Bactéries



Dans notre corps, elles seraient au moins dix fois plus nombreuses que les cellules humaines, soit la bagatelle de 100 000 milliards. Dix fois plus grosses qu'un virus, les bactéries sont les êtres vivants les plus répandus sur Terre. On en trouve dans tous les milieux, y compris les plus hostiles *(lire p. 56)*. La plupart sont inoffensives, voire bénéfiques pour l'organisme. Il existe néanmoins de nombreuses espèces pathogènes, responsables de maladies comme la diphtérie, la tuberculose, la syphillis... et des maladies nosocomiales qui prolifèrent dans les hôpitaux, suite à l'utilisation extensive d'antibiotiques qui a poussé les bactéries à muter pour résister aux traitements.

Génome

98% de l'ADN est non codant. Depuis le séquençage du génome réalisé dans les années 1990, on pensait que cette partie ne servait à rien, d'où son surnom « d'ADN poubelle ». Or, l'Encode Project, initié en 2003, a révélé fin 2012 que 80% de notre génome a bien une activité biochimique spécifique. Laquelle ? Cela reste à définir.

3 milliards

Le nombre de paires de bases – ou nucléotides – qui constituent la molécule humaine d'ADN. Leur enchaînement définit des parties codantes, les gènes, dont les informations permettent différents assemblages d'acides aminés conduisant à la fabrication de protéines, et donc déterminant la vie cellulaire. Il y a 20 000 gènes, soit 2% de l'ADN.

L'ADN

Dans le noyau de la cellulle se trouve l'ADN portant l'ensemble des gènes, qui régissent le développement d'un organisme vivant. L'ADN est replié en forme de pelotes, les chromosomes. Les gènes correspondent à des segments d'ADN situés à des endroits précis du chromosome.

Cancer

Mieux compris, mieux traité

L'analyse génétique des tumeurs et un meilleur ciblage des traitements ont permis à la cancérologie de réaliser des avancées remarquables au cours de ces dernières années.

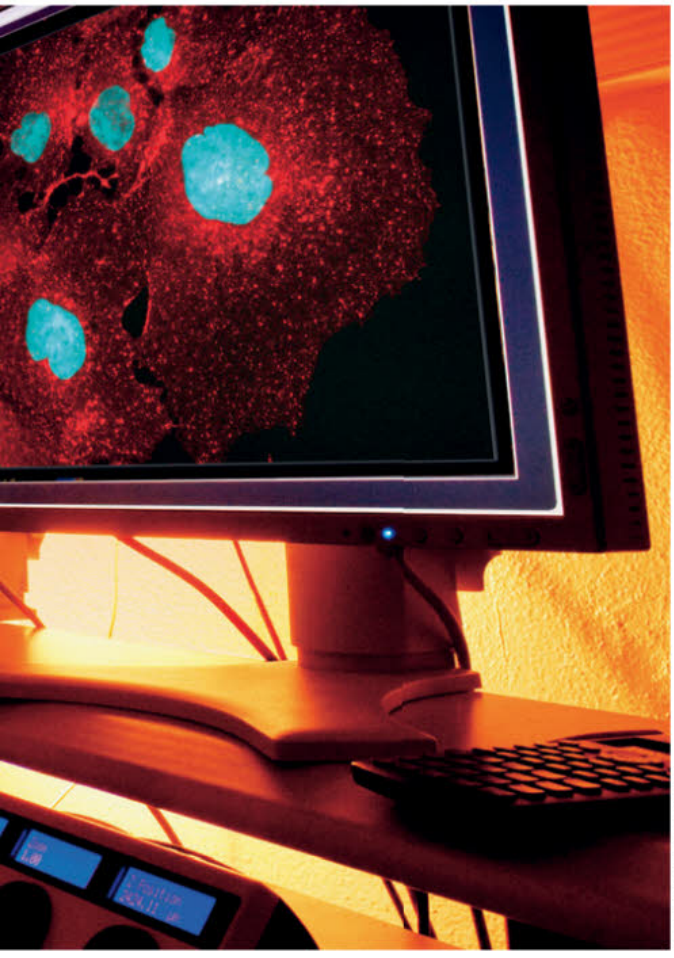
De plus en plus de cas, mais de moins en moins mortels... En trente ans, des progrès marquants ont été accomplis dans la lutte contre le cancer, notamment en matière de dépistage précoce et de traitements. L'analyse génétique des tumeurs, en particulier, permet aujourd'hui, dans nombre de cas, d'en déterminer très précisément les caractéristiques. Une tâche titanesque puisque chaque tumeur est le siège, en moyenne, de cent à plusieurs milliers de mutations génétiques ! Mais qui permet déjà de déterminer la thérapie la plus efficace pour un patient donné.

Un exemple : dans 40 à 50 % des cas de mélanome métastatique, on retrouve une mutation spécifique dans le gène codant pour la protéine BRAF, très impliquée dans les mécanismes de prolifération des cellules mélaniques cancéreuses. Or, elle peut être inhibée par un médicament, le vémurafénib. A partir d'une biopsie de la tumeur, la recherche de cette mutation permet donc de déterminer rapidement si la molécule est adaptée. De même pour le cancer du poumon, associé à différentes mutations définissant autant de protocoles de chimiothérapie. Ainsi que pour certaines formes de leucémies, de cancers du sein, de l'estomac ou du côlon... « *L'an dernier, les tumeurs de 60 000 patients – soit 15 % des malades en France – ont été analysées dans les centres mis en place par l'Institut national contre le cancer (INCa)* », rappelle Fabien Calvo, directeur de la recherche à l'INCa.

L'analyse génétique permet donc notamment aux oncologues de faire un choix parmi l'arsenal thé-

Le site de l'INCa : www.e-cancer.fr/cancerinfo

Pr Thomas Tursz, *La Nouvelle Médecine du cancer. Histoire et espoir,* Odile Jacob, 2013



JAMES KING-HOLMES/SPL/PHANIE

Les nanotechnologies sont l'une des voies les plus étudiées pour l'administration des traitements de demain. Ici, des chercheurs de l'université de Cardiff (Royaume-Uni) étudient la migration de nanoparticules vers des cellules cancéreuses de foie.

rapeutique dont ils disposent aujourd'hui : anticorps monoclonaux ciblés sur des protéines situées à la surface des cellules cancéreuses, médicaments anti-angiogénèse empêchant les tumeurs de se développer en bloquant la formation des vaisseaux sanguins qui les nourrissent, et, plus récemment, molécules visant à stimuler le système immunitaire pour que ce dernier attaque lui-même les cellules cancéreuses. Cette dernière voie, l'immunothérapie, est des plus prometteuses.

Les scientifiques comprennent en effet de mieux en mieux comment les cellules cancéreuses parviennent à inactiver les lymphocytes T, normalement chargées de les éliminer. Ils ont mis en évidence des protéines (PD-1, PDL-1) présentes à la fois à la surface de ces lymphocytes et des cellules cancéreuses : en entrant en interaction, elles affaiblissent le système immunitaire.

Une découverte capitale, qui ouvre de nouvelles pistes thérapeutiques. Plusieurs équipes mettent aujourd'hui au point une parade grâce à des molécules capables de bloquer ces protéines. Exemple : en juin dernier, les résultats encourageants d'un essai clinique mené auprès de 140 patients atteints de divers cancers (poumon, rein, côlon, estomac, peau) avec un anti-PD-L1 ont été annoncés au congrès mondial de cancérologie Asco, à Chicago ; la molécule avait fait rapidement régresser les tumeurs chez environ 20 % des malades.

Nanoparticules d'or éclairées

Et demain, les nanotechnologies développées depuis quelques années permettront probablement de parfaire les traitements, voire de les coupler au diagnostic. Les chercheurs travaillent en effet sur différents types de nanoparticules, toutes dotées de « sondes » capables d'identifier spécifiquement les cellules tumorales : nanoparticules délivrant le médicament exclusivement dans ces dernières ; capables de piéger les seules cellules malades avant d'être détruites par bombardement de neutrons ; nanoparticules d'or, qui ont la particularité de chauffer lorsqu'elles sont éclairées, ce qui permet de supprimer, par hyperthermie, les cellules cancéreuses auxquelles elles se lient…

En attendant ces applications encore lointaines, d'autres techniques de ciblage, plus simples, ont déjà vu le jour : l'application directe de radiofréquences – des ultrasons de haute fréquence délivrés par une sonde – au niveau des tumeurs permet de les détruire de façon très ciblée par la chaleur qu'elles génèrent. La sonde émettrice est placée directement sur la peau pour les tumeurs du foie. Ou bien, pour les moins accessibles, comme celles du poumon, sur un endoscope qui, une fois introduit dans la bronche, permet de viser précisément sa cible.

Certes, le nombre de nouveaux cas de cancers augmente chaque année en France : il s'élevait en 2012 à plus de 355 000, soit 110 % de plus qu'en 1980. Une explosion qui s'explique en partie par des facteurs environnementaux et comportementaux, mais aussi par la plus grande longévité de la population et des diagnostics plus précoces. *« Mais il faut rester optimiste, car on progresse très rapidement*, conclut Fabien Calvo. *L'objectif est que le cancer finisse par ne plus être qu'une maladie brève, avec peu de répercussions sur la vie sociale. »*

CLARA DELPAS

« L'an dernier, en France, l'analyse génétique des tumeurs a concerné 60 000 patients » Fabien Calvo

De multiples facteurs de risque

Les causes du cancer sont nombreuses et complexes. L'existence de formes familiales a permis de découvrir des facteurs de susceptibilité génétique : le cancer du sein, par exemple (5 à 10 % de cas familiaux), a d'autant plus de risques de survenir que l'on est porteur d'une mutation des gènes BRCA1 ou BRCA2. Dans d'autres cas, c'est une infection virale ou bactérienne qui est en cause : le cancer du col de l'utérus est dû à des papillomavirus (HPV16 ou 18), celui de l'estomac est souvent associé à une infection par *Helicobacter pylori*, bactérie responsable des ulcères gastriques. Pour d'autres encore, on retrouve des mutations dans les mécanismes de réparation de l'ADN (1)… Enfin, outre les facteurs de risque identifiés – comme le tabac – ou simplement présumés, comme le traitement hormonal substitutif de la ménopause pour le cancer du sein, on pointe de plus en plus du doigt des causes environnementales. *« On suspecte l'impact de certains plastiques ou perturbateurs endocriniens… »*, souligne Fabien Calvo, de l'INCa.

1. Quotidiennement, l'ADN d'une cellule mute. Des mécanismes de réparation se mettent alors en place. Mais ces mécanismes eux-mêmes peuvent s'altérer.

BENOÎT RAJAU/INSTITUT CURIE

Tout au long de la vie, des modifications épigénétiques peuvent affecter les gènes. Ici, un chercheur de l'Institut Curie analyse l'expression d'un de ces gènes.

Épigénétique
Une hérédité sous influence

L'histoire personnelle ou le mode de vie peuvent agir sur les gènes, sans qu'il y ait mutation de l'ADN. Une cause possible de pathologies.

L'arabette des dames *(lire aussi pp. 54-58)* sert depuis des années de modèle aux chercheurs en génétique. L'équipe de Christine Camilleri, de l'Inra de Versailles, a croisé l'une de ces plantes venue de Pologne avec une autre originaire du Tadjikistan. Dans leur descendance, certains individus étaient presque stériles : tout se passe comme si les deux plantes appartenaient à deux espèces différentes. Elles devraient donc avoir un code génétique différent. Pourtant, les chercheurs ont constaté que la séquence du gène qui, inactivé, entraîne la stérilité, est strictement identique dans les plantes d'origine et dans leur descendance. L'équipe a publié en janvier 2012 la solution à cette énigme : dans la plante tadjik, le gène est affecté par une modification « épigénétique » qu'elle a transmise à certains de ses descendants.

Épigénétique : le mot, forgé par le biologiste britannique Conrad Waddington dans les années 1940, signifie « au-dessus de la génétique ». Traduction : au cours du développement utérin, puis de la vie, certains gènes s'expriment et d'autres non, à travers trois mécanismes. Le premier implique les histones. Ce sont des protéines autour desquelles s'enroule l'ADN. Selon leur positionnement sur le génome et leur nature chimique, elles conditionnent l'expression de l'un ou l'autre gène. Deuxième voie possible de régulation : la méthylation, une modification chimique de la cytosine (la base du code génétique désignée par la lettre « C »), qui peut empêcher qu'ils ne s'expriment *(lire aussi p. 33)*. Enfin, des ARN (acides ribonucléiques, issus de la transcription de l'ADN) dits « non codants » peuvent jouer un rôle similaire.

Andras Paldi, *L'Hérédité sans gènes,* Le Pommier

L'alimentation pourrait induire des modifications dès le stade fœtal

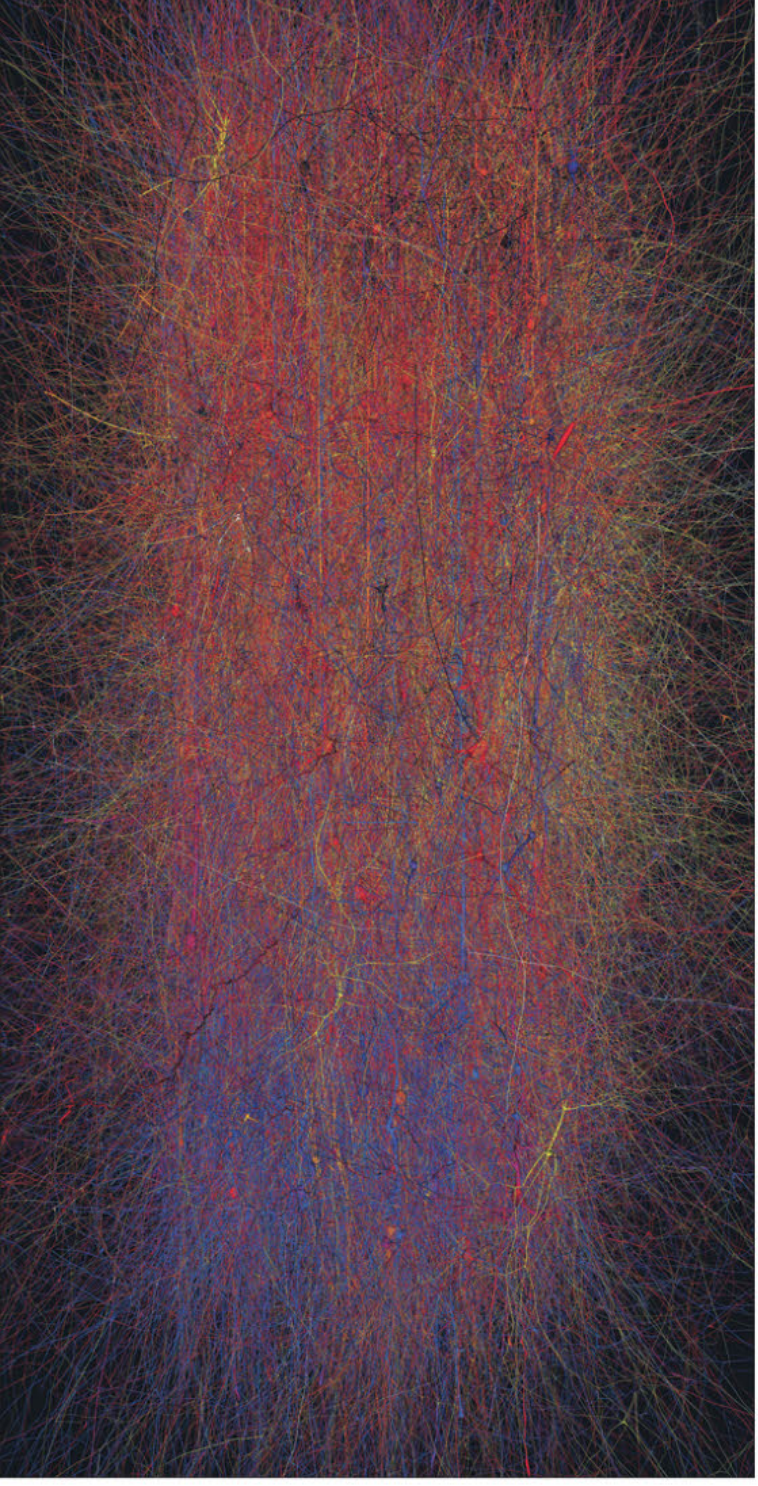
Une discipline en plein boom

« D'autres mécanismes restent peut-être à découvrir », souligne cependant Geneviève Almouzni, directrice de l'unité Dynamique nucléaire et plasticité du génome à l'Institut Curie, à Paris. La discipline est en plein boom. Car si l'épigénétique intervient normalement pour réguler les gènes tout au long de la vie, elle est aussi soupçonnée d'être impliquée dans nombre de pathologies. L'équipe de Geneviève Almouzni a ainsi mis en évidence que des histones sont caractéristiques de certaines formes de cancer du sein. *« Un lien de cause à effet reste à démontrer*, souligne la chercheuse. *Mais ces histones peuvent servir de marqueurs pour affiner les diagnostics. »*

Quelle est la cause de ces modifications épigénétiques indésirables ? L'influence de l'environnement est montrée du doigt, notamment l'alimentation ou l'exposition à des polluants chimiques, et ce, dès le stade fœtal. Avec à la clé, en cas de malnutrition de la mère par exemple, une plus grande susceptibilité à des pathologies comme le diabète. *« Rien n'est encore solidement démontré. Il ne faut pas culpabiliser les mères »*, souligne toutefois Geneviève Almouzni.

Ces modifications épigénétiques peuvent-elles être transmises à la descendance ? Sont-elles réversibles ? Chez l'animal, rien n'est certain. Pour les plantes, l'expérience de l'arabette montre que la transmission est possible. De nouvelles espèces pourraient donc se créer de manière « non génétique ». La théorie de l'évolution nous a pourtant appris que les espèces apparaissaient par mutation génétique et sélection naturelle. Faut-il la remettre en cause ? *« Non !* affirme Geneviève Almouzni. *Génétique et épigénétique interagissent. Tout l'enjeu aujourd'hui est de savoir comment. »*

JEAN-FRANÇOIS HAÏT



BBP/EPFL

La première colonne entière de cortex de jeune rat produite par le programme Blue Brain. Modélisation.

Cerveau

Cent milliards de neurones virtuels

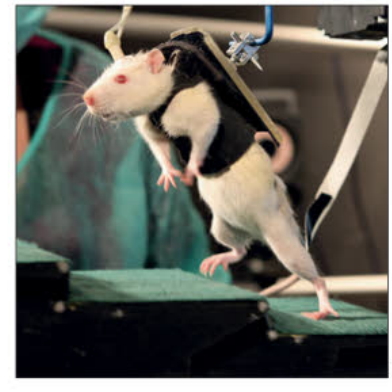
UN CERVEAU HUMAIN NUMÉRIQUE, aux milliards de neurones virtuels, capable de se comporter comme un vrai ? Tel est le sommet immense que des centaines de scientifiques veulent gravir au cours de ce XXIe siècle. Pour ce faire, deux projets d'envergure ont été lancés en 2013. Le plus important est européen. C'est le Human Brain Project (HBP), qui a obtenu en janvier une dotation de plus d'un milliard d'euros par la Commission européenne. S'appuyant sur le Blue Brain – projet de cerveau numérique déjà existant – de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), le HBP se donne pour tâche d'utiliser toutes les données disponibles en physiologie et en imagerie médicale pour faire fonctionner et réagir un cerveau virtuel, qu'il soit sain ou malade. Et ce, grâce à un supercalculateur capable de réaliser à terme 10^{18} opérations par seconde. Pour l'instant, seules quelques colonnes de cortex de rat, simulées, tournent sur le système. Premier résultat : en juillet, les chercheurs ont publié dans *Neuron* une étude affirmant que leur modèle (de 12 000 neurones) générait une activité électrique virtuelle analogue « dans une très large mesure » aux ondes cérébrales mesurées *in vivo* chez les rongeurs. Un début enthousiasmant !

Mais l'Europe n'est pas seule dans la course. En avril, les Etats-Unis ont annoncé le lancement d'une cartographie du cerveau humain, baptisée initiative Brain (Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies). Selon le National Institute of Health, l'Agence américaine chargée de la recherche médicale, Brain entend produire une nouvelle imagerie dynamique « révolutionnaire » du cerveau, montrant « comment les cellules individuelles et les circuits neuronaux complexes interagissent à la fois dans le temps et l'espace ». Dotée de 100 millions de dollars comme mise de départ, l'idée, ici, est d'obtenir une sorte d'encyclopédie descriptive et fonctionnelle du cerveau en action et d'étudier ainsi des pathologies comme Alzheimer, Parkinson, l'épilepsie ou des lésions cérébrales traumatiques. A l'EPFL, on s'abstient de parler de concurrence, préférant y voir plutôt une approche complémentaire qui pourra alimenter en données le modèle que développe le Human Brain Project.

ELENA SENDER

MOELLE ÉPINIÈRE **PARALYSÉS, ILS REMARCHENT !**

C'est l'un des espoirs de la médecine : réparer la moelle épinière lésée des paraplégiques pour qu'ils puissent remarcher. En juin dernier, l'équipe de Grégoire Courtine, de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, a démontré qu'une stimulation chimique puis électrique au point de lésion, suivie d'un entraînement physique soutenu, « réveillait » la moelle épinière d'un rat paralysé. *« Les ingrédients nécessaires à la marche sont là, mais dans un état dormant*, explique Grégoire Courtine. *Nous avons apporté à la moelle épinière ce que le cerveau lui donne en temps normal : des molécules activatrices et des impulsions électriques. »* Deux mois plus tard, le rat courait sur un tapis roulant… En novembre 2012, à l'université de Cambdridge, ce sont des teckels qui avaient retrouvé l'usage de leurs pattes arrière, après injection dans leur moelle épinière endommagée de cellules gliales olfactives prélevées dans leurs cavités nasales. Ces cellules, qui peuvent se différencier en cellules nerveuses, ont rétabli les liaisons nerveuses sectionnées. Seuls des essais permettront de valider ces résultats chez l'homme. E. S.



EPFL

Interview

Marc Peschanski, biologiste

« Que vaut le progrès s'il ne bénéficie pas à tous ? »

La recherche médicale promet des avancées spectaculaires pour les prochaines décennies. Autant de défis scientifiques qui posent de nouvelles questions éthiques.

Quelles sont les dernières avancées en matière de réparation du corps humain ?

Les découvertes sur les cellules souches sont sans aucun doute parmi les plus prometteuses de cette dernière décennie. Encore une dizaine d'années, et l'on pourra confirmer – ou pas – la réalité d'une médecine régénératrice, capable de créer, à partir de ces cellules, des tissus de remplacement vivants et fonctionnels. Les premiers essais cliniques chez l'homme sont déjà lancés. Ils utilisent des populations cellulaires issues soit de cellules souches embryonnaires, soit de CSPi, fabriquées à partir de cellules adultes *(lire « Trois types de cellules » p. 59)*. On saura donc bientôt s'il est possible de produire en laboratoire de la peau, du pancréas, du cœur, de l'os, du neurone, de la rétine ou du cartilage. Si tel est le cas, nous devrons passer à l'étape suivante : la production à grande échelle. Et là, le défi s'annonce colossal ! Par exemple, l'entreprise américaine Advanced Cell Technology a lancé un essai de thérapie cellulaire contre la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) *(lire aussi pp. 26-29)*. L'essai, qui met en jeu des moyens considérables, porte sur quelques dizaines de patients seulement. Si, dans deux ans, les résultats sont positifs, que fait-on ? La DMLA affecte 12 millions de personnes aux Etats-Unis, 2 millions en France… Comment passer de quelques volontaires à des millions de patients ? Une grande échelle de production implique de la recherche, des technologies, de la formation, encore inexistantes. Les industriels doivent se pencher sur la question dès aujourd'hui. Sinon, nous serons confrontés à un problème éthique majeur : nous disposerons d'un traitement sans pouvoir en faire bénéficier le plus grand nombre.

A quand la création d'organes en laboratoire ?

Pour y parvenir, il faudra cumuler les acquis de la biologie, la biochimie, la biophysique, la science des polymères, l'informatique et toutes les technologies de communication. Et travailler sur des populations composites de cellules qui acceptent de prendre certaines formes, de s'intégrer, de se contrôler les unes les autres. On ne sait pas encore réaliser cette prouesse, mais on y parviendra sans doute. On est déjà capable, de manière expérimentale, d'élaborer en trois dimensions un tissu entier, l'épiderme. Des équipes travaillent aussi sur les vaisseaux sanguins. On avance ! Le principal obstacle est… humain. Il faut pouvoir faire collaborer des chercheurs d'univers totalement différents. Si l'on y réussissait, l'homme reconstruit pourrait voir le jour à l'horizon 2100.

> « L'homme reconstruit pourrait voir le jour à l'horizon 2100 »

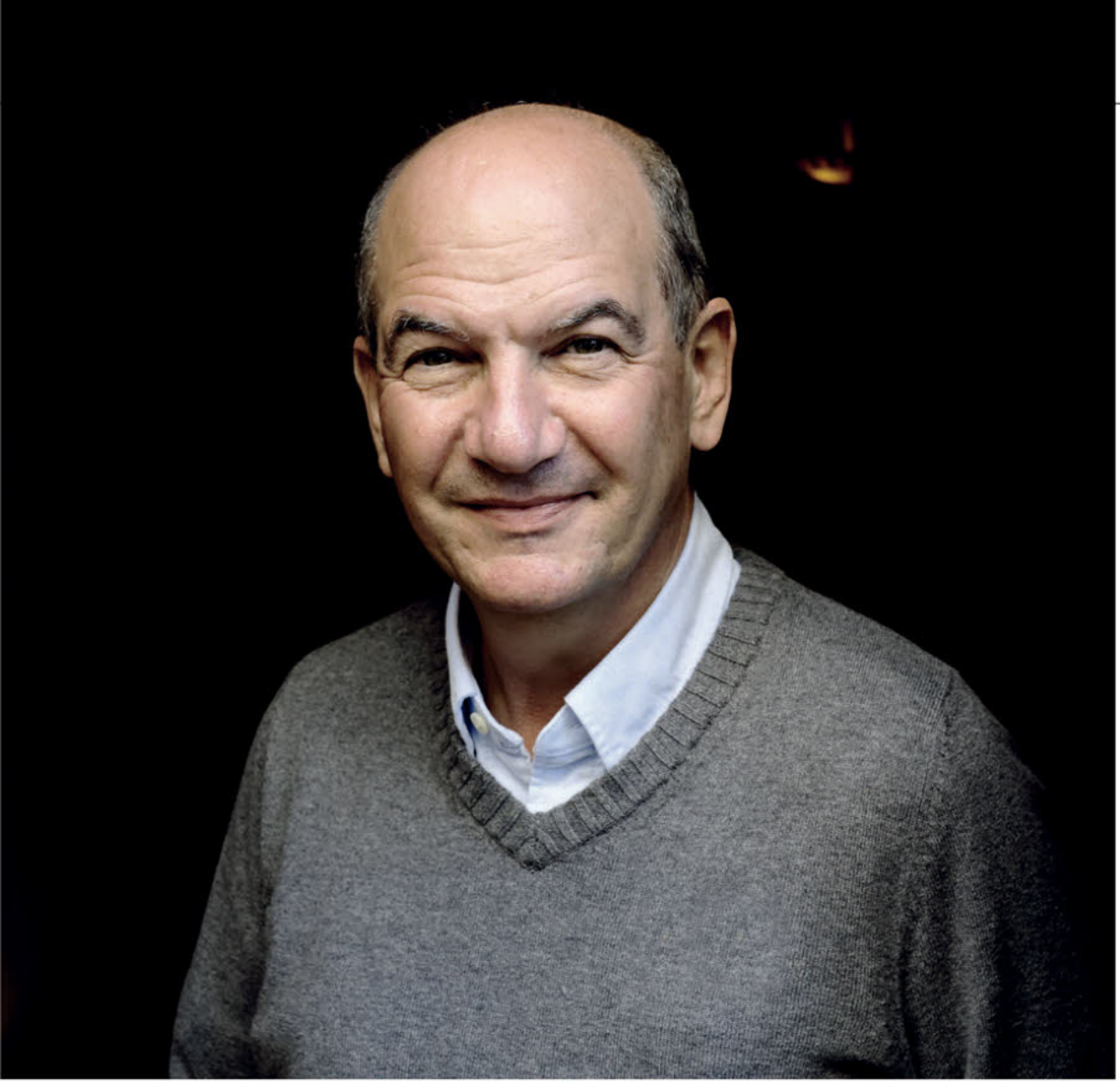
Plus la recherche avance, plus les connaissances semblent complexes. Pourra-t-on un jour établir une vérité scientifique en biologie ?

Les années 1990 ont été marquées par la fin du tout-génome. On a compris qu'analyser ce dernier était réducteur puisque, pour prendre une image liée à l'informatique, il était le programme et non l'application. Or, c'est l'application qui importe. L'objet de nos travaux est aujourd'hui de comprendre comment se fabrique le vivant. Pour cela, nous utilisons différents outils (biologie moléculaire, biologie cellulaire, imagerie, etc.) qui apportent chacun des réponses parcellaires, établissant un certain nombre de certitudes sur lesquelles nous pouvons nous appuyer. Mais nous savons pertinemment que la certitude d'aujourd'hui sera demain battue en brèche, considérée au mieux comme réductrice, au pire comme fausse. Aucun d'entre nous ne pense qu'il y aura un jour une théorie considérée comme définitive dans la compréhension du vivant.

En médecine non plus, point de vérité absolue ?

C'est encore pire ! La médecine n'est pas un domaine d'application normé. D'abord parce que chaque médecin a sa propre pratique. Mais aussi parce que la discipline n'est pas une simple traduction de résultats scientifiques, mais une appréhension globale de phénomènes. Je suis très admiratif de ces médecins qui, face à des malades condamnés à mourir d'une affection contre laquelle, techniquement, ils ne peuvent rien, sont capables de les amener à sortir de consultation avec le sourire, sans leur avoir menti, mais en leur ayant donné un moral d'acier. Ça, c'est de la médecine.

Reste que notre système de prise en charge médicale – notamment hospitalier – doit se repenser. Il a été créé pour répondre aux grandes infections, aux grands acci-



MARC PESCHANSKI, biologiste et neurophysiologiste, est directeur scientifique de l'Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques (I-Stem) de l'Inserm/ université d'Evry associé à l'AFM/ Téléthon. Dernier ouvrage paru : *Le Cerveau et la pensée*, Les Bons Caractères, 2012.

dents. Or, aujourd'hui, dans le même cadre, on soigne des patients qui vivent avec une pathologie chronique pendant trente ans. Ce n'est pas raisonnable. Il faut, par exemple, envisager un suivi à distance des malades grâce aux nouvelles technologies. Et que les filières de soins soient impliquées dans ces réseaux qui s'étendraient sur tout le territoire.

Quels sont les médicaments du futur ?

Grâce aux avancées spectaculaires de la recherche, notamment le décryptage du génome, on a découvert que l'on pouvait soigner avec des facteurs protéiques : facteurs de croissance, enzymes… La médecine est donc en train de se métamorphoser, passant du tout-pharmacologique (des médicaments, comme l'aspirine ou le Voltarène, produits par la chimie) au tout-protéique (des médicaments produits par la biologie, telle l'érythropoiétine, la fameuse EPO, qu'on utilise pour traiter les anémies mortelles). Un composé pharmacologique n'est formé que de quelques atomes. Sa production industrielle grâce aux techniques de la chimie est donc relativement simple. Il n'en est pas de même des protéines, monstres de plusieurs milliers d'atomes dont comptent non seulement la séquence, mais aussi la conformation spatiale. Dans ce cas, on doit faire appel aux biotechnologies, à des « usines de production biologiques », bactéries, plantes, etc. Ces médicaments biologiques correspondent à plus de la moitié des nouveautés thérapeutiques. Le problème, c'est que produire, par exemple, une protéine anti-TNFalpha pour traiter la polyarthrite rhumatoïde, cela coûte cher. Très cher. Ce qui pose une sérieuse difficulté morale.

Justement, quelles sont les questions éthiques qui surgissent avec ces nouvelles thérapies cellulaire, génique, protéique ?

La première est : « Est-ce vraiment de cela que nous avons besoin ? » Une question fondamentale dans un monde où les gens meurent encore de faim, où des pathologies touchent des continents entiers sans être traitées alors qu'elles pourraient l'être. C'est mon problème éthique majeur : que vaut le progrès s'il ne bénéficie pas à tous ? En découle un autre : quelles doivent être les priorités en matière de santé ? Un exemple : le premier produit de thérapie génique dont la mise sur le marché a été autorisée par l'Agence européenne du médicament est le Glybera, indiqué pour une maladie rare chez l'adulte qui entraîne des pancréatites répétées. Coût du traitement : 1,25 million d'euros par patient ! Comment parvenir à traiter en même temps 20 personnes à un coût élevé et 20 millions à faible coût ? Il va falloir réfléchir collectivement à la façon de placer la santé au cœur des priorités de l'humanité. Ces problèmes éthiques fondamentaux ne seront pas solubles au niveau d'une nation. Ils sont mondiaux.

PROPOS RECUEILLIS PAR ELENA SENDER

PHOTO : BRUNO CHAROY/PASCO & CO POUR SCIENCES ET AVENIR

DRONES : LA RÉVOLUTION DES SANS-PILOTES

Taranis, un drone de combat actuellement développé en Grande-Bretagne. Pratiquement indétectable par les radars, il sera capable de frappes à très longue distance.

BAE SYSTEMS

Ce sont les combattants du futur. Mais les drones n'évoluent pas seulement en terrain militaire. Ils assistent déjà les ingénieurs, pompiers ou climatologues.

Une chauve-souris espionne qui recharge ses batteries sur une ligne à haute tension, une abeille bionique qui capte l'odeur, l'image et le son, ou encore des papillons bardés de nano-électrodes commandées à distance qui enregistrent vos faits et gestes… Science-fiction ? Pas vraiment. Car tous ces drones sont en passe de devenir réalité.

Depuis que les Etats commencent à leur ouvrir leur ciel, les drones n'en finissent plus de prendre leur envol. En avril 2012, la France a été le tout premier pays au monde à autoriser l'évolution d'engins civils sans pilote dans son espace aérien, créant ainsi un gigantesque marché. *« C'est une révolution mondiale ! Les drones marquent une grande rupture technologique. Et nous ne sommes qu'au début de cette fabuleuse aventure ! »*, souligne Frédéric Serre, l'heureux co-fondateur et président du directoire de Delta Drone, une société récemment cotée en bourse.

Premiers vols en 1917

Pourtant, si leur utilisation se popularise à toute vitesse, ils sont longtemps restés cantonnés à un usage strictement militaire. Les UAV (Unmanned Aerial Vehicle) ou drones (« faux bourdons » en anglais, ainsi baptisés en raison de leur vol « bourdonnant »), existent depuis 1917. Au départ, il s'agit seulement d'avions modifiés, commandés à distance, ayant à bord un pilote ●●●

Bardés d'équipements de pointe

MATÉRIAUX

Représentant 80 % du poids de l'engin, ils doivent être légers et robustes. Sont ainsi utilisés la fibre de verre, de carbone ou d'aramide (du polyamide) pour les pièces soumises aux plus fortes contraintes, les résines polymérisées sous étuve ou le titane. Le Neuron de chez Dassault a même inauguré la technique de fabrication additive par frittage sélectif au laser, une fabrication de pièces en 3D.

SYSTÈMES OPTIQUES ET RADARS MINIATURISÉS

Sont employés notamment des capteurs hyperspectraux, qui prennent de multiples images de la même scène dans des centaines de longueurs d'ondes différentes, des caméras thermiques refroidies par cryogénie, des radars infrarouges tenant dans une boîte de 30 centimètres et consommant aussi peu d'énergie qu'un allume-cigare...

BATTERIES

Les « classiques » lithium-polymère et lithium-ion évoluent vers des mélanges aluminium-air et zinc-air, trois fois plus performants. Mais la solution d'avenir serait la pile à hydrogène, car elle permettrait de décupler l'autonomie de vol.

INTELLIGENCE EMBARQUÉE

Grâce à la nano-informatique, des algorithmes ultrasophistiqués permettent aux drones non seulement de respecter un plan de vol mais de prendre une décision de manière autonome en cas de problème : désorientation, vol en essaim, perte des transmissions, risque de collision, piratage...

●●● capable d'intervenir en cas de problème. C'est en France qu'ont lieu les premiers vols, sur une distance d'un kilomètre. L'année suivante, le record est largement battu puisque le seuil des 100 kilomètres est franchi ! En 1920, le président du Conseil Georges Clemenceau finance le projet vite abandonné d'un avion sans pilote.

Tueurs à taille de guêpe

Il faut attendre la capture, en 1960, de l'aviateur américain Gary Powers et de son U-2 par les Soviétiques pour assister à une course effrénée aux UAV. Durant la guerre du Viêt-Nam, des drones (les Firebee) sont utilisés pour la première fois dans des missions secrètes de reconnaissance et de sape psychologique – ils larguent des tracts sur les populations. Mais c'est la guerre du Golfe, en 1990-1991, et son concept de « zéro mort », qui marque un vrai tournant. *« Les hélicoptères d'observation radar Horus étaient incapables de voir derrière une colline. Alors que les Mart (mini-avion de reconnaissance télépiloté) et les drones Pioneer permettaient de récupérer en quelques secondes toutes les informations nécessaires (localisation des cibles, des leurres, positions ennemies...)*, explique Océane Zubeldia, capitaine au Centre d'études stratégiques aérospatiales, spécialiste des drones. *La guerre moderne est une guerre de l'information, où l'anticipation est la clé du succès. Et grâce aux drones, on peut voir se dérouler une action donnée comme dans un film. »*

Après l'attentat du 11 septembre 2001, les drones deviennent une priorité et voient leurs utilisations s'élargir. L'espionnage ne suffit plus. Il faut pouvoir se défendre et, au besoin, riposter. Après les UAV de type Hale (haute altitude, longue endurance), comme le RQ-4 Global Hawk capable de voler plus de 30 heures sans ravitaillement et de distinguer la marque d'un paquet de gâteaux à 18 000 mètres d'altitude, on peut désormais compter sur les Ucav (Unmanned Combat Air Vehicle) ou « drones de combat », armés jusqu'aux dents. Tel le MQ1- Predator, mesurant 8 mètres de long pour 15 mètres d'envergure, qui peut atteindre 740 km/h et larguer ses missiles de pointe à plus de 15 000 mètres d'altitude sur un engin terroriste de la taille d'une Jeep. Mieux encore, les drones de combat furtifs qui échappent à tous les radars et aux détections infrarouges. Ainsi, le RQ-170 Sentinel qui aurait permis d'espionner Oussama Ben Laden, ou le Neuron de chez Dassault, dont le premier « démonstrateur », isolé sous une bulle pour cacher ses secrets technologiques, a été présenté cette année au Salon du Bourget. *« Les drones militaires du futur seront furtifs*, précise Océane Zubeldia. *On peut imaginer, dans les prochaines années, des combats aériens les opposant à des avions de chasse. »*

Autres prouesses technologiques à venir : les nano-drones. En France, la DGA (Délégation générale de l'armement) travaille déjà sur des engins de la taille d'une libellule capables d'évoluer dans des milieux urbains difficiles d'accès et d'identifier visages ou plaques d'immatriculation. Aux États-Unis, la Darpa (Defense Advanced Research Projects Agency) va jusqu'à étudier la possibilité d'utiliser de vrais

F. GARZELNICK / DEFENSE IMAGERY

L'un des Firebee, drones vedettes de la guerre du Viêt-Nam.

EADS

Le Trospheric Airship est destiné à l'observation de l'Arctique.

Océane Zubeldia, *Histoire des drones*, Perrin, 2012

Le site d'un fabricant de drones civils : deltadrone.com

Un démonstateur du drone de combat X-47B est catapulté par un porte-avions. Cet appareil américan furtif devrait être opérationnel vers 2020.

GETTY IMAGES/BUSINESS WIRE

insectes à des fins d'espionnage. *« Des nano-électrodes sont implantées dans le système nerveux d'une mouche ou d'une araignée, par exemple, et par électro-stimulation des muscles, on peut contrôler l'insecte à distance. Certains ingénieurs tenteraient même de mettre au point des drones-tueurs grâce à des guêpes »*, explique Océane Zubeldia.

Surveiller les cyclones

De quoi faire frémir ! Car de tels drones inquiètent. Big Brother n'aura bientôt plus seulement de longues oreilles et de grands yeux, mais pourra espionner n'importe qui, n'importe où, n'importe quand, et l'assassiner tranquillement dans son salon. Tel est l'objectif du drone Spider-Man, dont le prototype est capable de s'agripper presque en silence à des parois verticales et d'y surveiller sa victime aussi longtemps que nécessaire avant de l'éliminer.

Big Brother pourra espionner n'importe qui et l'assassiner tranquillement dans son salon

« Avec de tels projets, on comprend mieux pourquoi les drones font si peur, regrette le capitaine. *Pourtant, ils sont aussi au service de l'homme : pour lutter contre le terrorisme comme pour optimiser le rendement d'une surface agricole ou étudier les cyclones. »* Des drones solaires de grande taille, tel le britannique Zéphyr, seront ainsi capables un jour de remplacer nos satellites. Outre leur poids plume et leur faible coût, leurs batteries solaires leur garantiraient une autonomie quasi éternelle, et leur altitude de vol à 20 000 mètres, une stabilité sans équivalent. Plus impressionnant encore : le drone-ballon Airship, dernier-né de chez EADS. Un engin troposphérique à hélium aux allures de catamaran, qui permettra de surveiller l'évolution de l'Arctique et d'étudier la pollution atmosphérique.

Trousse à outils

« Dans le domaine civil, les applications sont infinies. Un drone est comme un ordinateur sans logiciel, une coquille vide. Le but est de développer des programmes aussi originaux qu'intelligents. ●●●

En France, un usage civil très réglementé

Si tout le monde peut posséder son drone, les conditions imposées par la DGAC (Délégation générale de l'aviation civile) sont draconiennes. Il faut un diplôme pour le piloter. Dans les zones peuplées, il doit peser moins de 4 kg et disposer d'un parachute, voler à 150 mètres de haut et ne pas s'éloigner de plus de 100 mètres du télépilote, qui le commande à vue. Dans les zones non peuplées, il peut atteindre 25 kg. En revanche, il ne doit pas dépasser 50 mètres d'altitude lorsque le pilote le commande à distance, mais il peut balayer une zone horizontale de 2 kilomètres de diamètre. Les drones habilités à parcourir plusieurs kilomètres (pour surveiller des lignes à haute tension par exemple) doivent peser moins de 2 kg et le pilote, posséder un brevet de pilotage justifiant d'au moins 100 heures de vol.

●●● *Le drone de demain fera partie de la trousse à outils du salarié sur le terrain »*, constate Frédéric Serre, fier d'avoir mis au point le Delta H, un appareil capable de retrouver les victimes d'une avalanche. Une ligne à haute tension défectueuse, le survol d'une centrale nucléaire après un accident, la surveillance d'une frontière, la distribution de médicaments dans des zones sinistrées, l'observation de nouvelles espèces végétales ou plus simplement la surveillance de sa maison pendant les vacances… Tout est possible.

Violation de la vie privée

La SNCF, ERDF, les services de police, de pompiers, les agriculteurs et certains gros industriels passent déjà commande aux 220 start-up françaises. La télévision, elle aussi, s'oriente peu à peu vers une nouvelle forme de journalisme. Le drone de France Télévisions s'est approché des coureurs du Tour 2013 comme aucun hélicoptère n'aurait pu le faire. *« Aujourd'hui, le drone remplace l'œil. Demain, il sera doté de bras et permettra, par exemple, à un invalide de réaliser des tâches, à un chirurgien d'opérer à distance ou à un ingénieur de réparer un édifice sans risquer sa vie,* souligne Frédéric Serre. *Nous avons ouvert en février, à Grenoble, une "école française du drone" pour former des pilotes et des techniciens à ce nouveau métier. 30 000 à 40 000 emplois seront créés dans les prochaines années. »*

Aux Etats-Unis, un temps retardés par la FFA (Federal Aviation Administration), des dizaines de milliers de drones civils se préparent à sillonner le ciel. La réglementation devrait être moins sévère qu'en France *(lire l'encadré p. 43)*. Avec tous les risques que cela comportera : collisions, violation de la vie privée, surveillance illégale et, pourquoi pas, tueries de masse… D'autant que tous les drones pourront peut-être, comme le Parrot, être pilotés par Iphone ou tablette numérique…

ALEXANDRE MOIX

TORU HANAI / REUTERS

Robots
Bons à tout faire

Ils sont soldats ou auxiliaires de vie, dialoguent avec des autistes ou se contentent… de passer la serpillère. Rencontre avec des assistants du troisième type.

Pour se faire une idée de ce que serait une attaque de robots, il suffit de regarder les vidéos que Boston Dynamics poste régulièrement sur le web. Cette société installée dans le Massachusetts, sorte de ferme à machines de guerre, travaille depuis des années en relation étroite avec l'armée américaine. Atlas, sa dernière création, exhibe tous les atours de l'humanoïde anxiogène. Comme nous, il possède deux bras, deux jambes et une tête. Mais il a le regard vide d'une machine menaçante, sans états d'âme. Comme nous, il est bipède. Mais sa démarche est un subtil mélange d'humanité et de mécatronique qui le rend épouvantable. Il court avec la détermination d'un zombie lancé derrière un marathonien. Quant aux obstacles, il les franchit avec les mêmes gestes qu'un soldat sur le parcours du combattant. En bref, Atlas fait peur, et c'est le but. Il résume à lui seul ce qui a longtemps fait la doctrine militaire américaine : une guerre zéro mort, du moins du côté des G.I.!

Un bon soldat : ce devrait donc être ça, le robot *made in USA*. A quelques exceptions près. Car pendant que les uns s'entraînaient à la guerre, les autres, comme le fameux aspirateur autonome Roomba, aspiraient pacifiquement, dès 2002, le salon de *geeks* peu exigeants sur la propreté de leur intérieur. Son concepteur, iRobot, étend de plus en plus sa gamme domestique, avec notamment Braava, version serpillère de Roomba, ou encore Looj… qui nettoie les gouttières.

Les temps changent, et le signe le plus fort de cette mutation a été le lancement en 2011, par Barack Obama, de la National Robotic Initiative (NSI), dont l'objectif est de préparer la prochaine génération de robots, des machines qui travaillent

Boston Dynamics : youtube. com/ watch?v= FFGfqOpRczY

IRobot : irobot.com /global/ fr/home.aspx

Asimo : universcience.tv/ video-asimo-un-robot- pour-nous-servir-5717.html

Le site de Hiroshi Ishiguro : geminoid. jp/en/ index.html

Hal : cyberdyne. jp/ english/

Nao : aldebaran-robotics.com/fr/

Le site de la Robocup : robocup. org/

ED ALCOCK/ALDEBARAN ROBOTICS

Humanoïdes conviviaux, Asimo (à gauche) et Nao ont été développés pour aider les personnes malades, interagir avec des enfants ou encore former des étudiants.

en coopération avec les hommes. Une vision qui domine depuis longtemps dans l'autre grand pays du robot : le Japon. Voilà des années que le pays est angoissé par le vieillissement de sa population, et il finance de nombreux programmes de recherche pour la conception de robots assistants. Représentant emblématique de ce mouvement : Asimo, le célèbre humanoïde développé par Honda, qui a pour vocation, entre autres, d'aider les personnes ayant perdu leur mobilité.

Plus fort que Lionel Messi

Le Japon est aussi en première ligne pour la conception d'exosquelettes, telle cette machine baptisée Hal, de la société Cyberdyne, déjà introduite dans des centres médicaux : accrochée aux jambes et à la taille, elle soutient les malades ayant des difficultés à se déplacer seuls. Mais ils soignent aussi l'expressivité de ces machines amenées à vivre parmi eux. Explorant la conception de robots si humains que le risque de confusion entre eux et nous semble de moins en moins appartenir à la SF. L'extravagant Hiroshi Ishiguro, de l'université d'Osaka, a ainsi conçu des machines reproduisant à la perfection ses propres traits. Son rêve : que ces humanoïdes donnent des cours à sa place à l'université.

Entre les Etats-Unis et le Japon, l'Europe commence à se faire une petite place. La France rêve même de devenir leader mondial du secteur ! En mars dernier, Arnaud Montebourg, ministre du Redressement productif, a d'ailleurs lancé un programme de 100 millions d'euros pour soutenir la filière.

Il est vrai que l'Hexagone se défend plutôt bien. L'un des plus gros succès du marché est le célébrissime Nao d'Aldebaran Robotics, apparu pour la première fois en 2006. Malgré son petit gabarit, 58 centimètres pour 5 kilogrammes, cet humanoïde à l'allure de jouet a réussi à s'imposer dans les laboratoires de recherche, les universités et les écoles d'ingénieurs. Il s'est vendu à plus de 3000 exemplaires dans 60 pays. Il est notamment utilisé pour interagir avec des enfants autistes et des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer, ou encore pour la formation d'étudiants en robotique. Surtout, il est devenu en 2008 le robot officiel de la Robocup, compétition internationale qui a pour objectif de constituer, d'ici le milieu du XXIe siècle, une équipe de robots footballeurs capable de battre la meilleure équipe du moment. Les futurs Lionel Messi et autres Cristiano Ronaldo n'auront plus qu'à aller cirer le banc de touche !

OLIVIER HERTEL

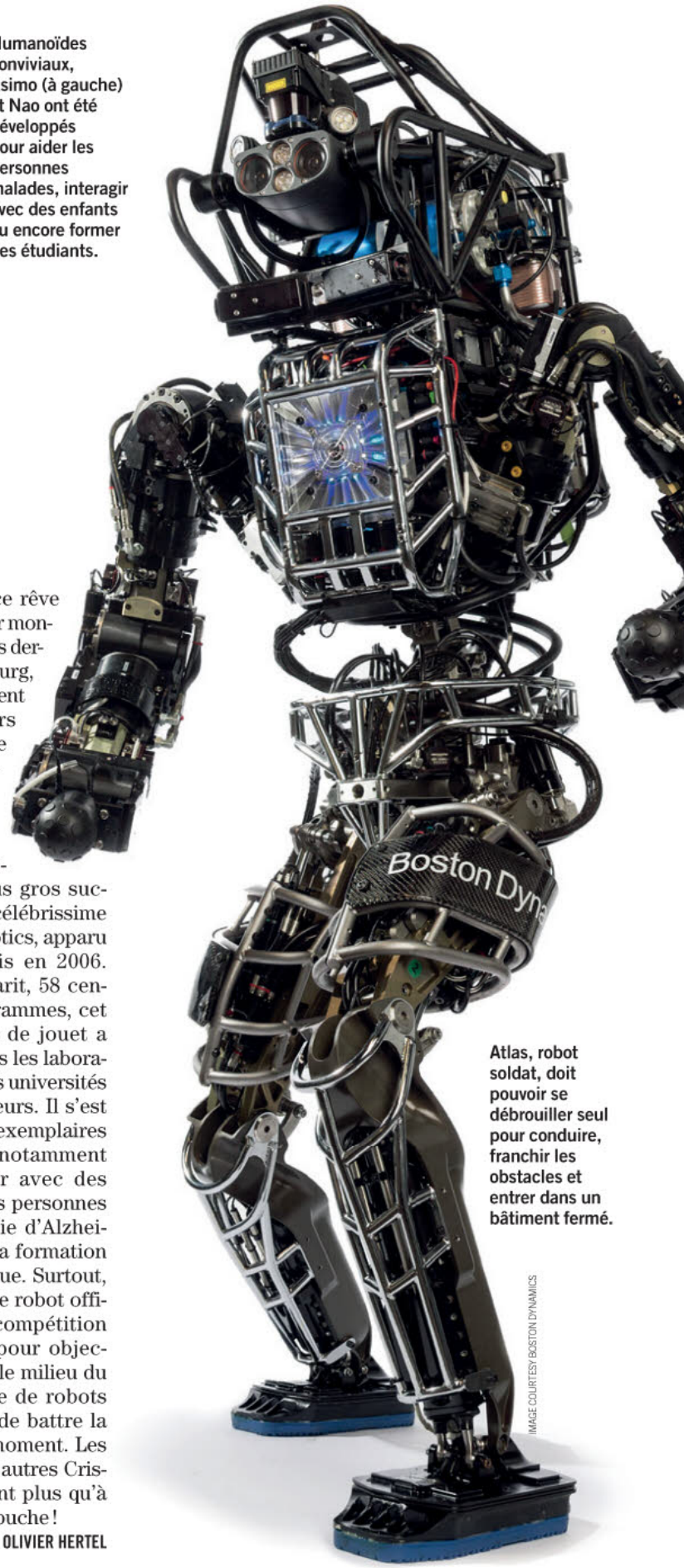


IMAGE COURTESY BOSTON DYNAMICS

Atlas, robot soldat, doit pouvoir se débrouiller seul pour conduire, franchir les obstacles et entrer dans un bâtiment fermé.

Spatial

Le privé s'envoie en l'air

Desserte de la Station spatiale internationale, tourisme sur orbite... Les premiers vaisseaux privés décollent et veulent se faire une place sur un marché contrôlé par la Nasa.

Le 26 mars dernier, une capsule spatiale retenue par trois parachutes amerrit dans le Pacifique. Une image familière : c'est ainsi que les astronautes d'Apollo revenaient de la Lune. La capsule, elle, est inhabitée et arrive tout droit de la Station spatiale internationale (ISS). Mais le pavillon du bateau qui vient la récupérer est noir, frappé d'un dragon... le nom de la capsule, propriété de SpaceX, une société privée créée en 2002 par Elon Musk. Devenu milliardaire en co-fondant Paypal, le système de paiement en ligne, ce fou de technologie, qui vient de proposer le projet Hyperloop, des habitacles de 26 passagers propulsées au sol à 1224 km/h dans des tubes géants, compte bien se faire aussi une place dans le spatial. SpaceX a remporté l'appel d'offres Cots (Commercial Orbital Transportation Services) lancé par la Nasa en 2006 pour la desserte de l'ISS en matériel et en hommes.

C'est dans ce cadre que la firme a réalisé le premier vol spatial orbital privé au monde en 2010, avec une maquette de Dragon lancée par Falcon 9, sa propre fusée. Le 22 mai 2012, la « vraie » Dragon réussit le premier arrimage d'un engin privé à l'ISS. Elle doit désormais effectuer trois à quatre vols par an vers la station pour y livrer du matériel. Une version habitée est également à l'étude, qui pourrait embarquer jusqu'à sept astronautes. *« Premier vol d'ici à 2015 ! »*, annonce avec optimisme SpaceX.

Cinq minutes d'impesanteur

Orbital Sciences n'en est pas encore là. Mais cette société américaine qui fabrique des satellites et fournit des systèmes spatiaux à la Nasa a elle aussi bénéficié de Cots. Le 21 avril dernier, c'était le vol inaugural de son lanceur Antarès, prélude au lancement de son module cargo Cygnus, qui assurera lui aussi le transport de fret vers l'ISS. Une mission de démonstration devait avoir lieu mi-septembre.

Le modèle économique de SpaceX et d'Orbital Sciences ne repose pas uniquement sur les vaisseaux spatiaux. Tous commercialisent aussi les services de leurs propres lanceurs pour la mise sur orbite de satellites. Sont-ils en mesure de concurrencer les agences étatiques ? Il est sans doute trop tôt pour le dire. *« La Nasa a eu recours au secteur privé parce que la navette spatiale allait prendre sa retraite et qu'elle ne voulait pas être dépendante des vaisseaux russes*, explique Isabelle Sourbès-Verger, géographe spécialiste du spatial au

REPÈRES

Budgets 2013-2014 des agences spatiales nationales
(en milliards d'euros, pour le civil)

Etats-Unis : 12,7
Russie : 4,8
Europe : 4,2
Japon : 2
Chine : plus de 1 *(estimation)*
Inde : 0,83

SOURCES : AGENCES SPATIALES (SAUF CHINE)

Chiffre d'affaires des entreprises privées

Orbital Science : 1,3 milliard de dollars en 2011

Virgin Galactic : 100 millions de dollars *(estimation)*

Prototype du vaisseau Virgin Galactic SpaceShip Two, qui prévoit d'emmener, à la fin de l'année, des passagers pour quelques minutes d'impesanteur.

GETTY IMAGES/AFP

centre Alexandre-Koyré d'histoire des sciences et techniques, à Paris. *Toute la question est de savoir si SpaceX et Orbital vont pouvoir tenir le rythme élevé des lancements et les prix bas qu'ils annoncent.* »

On peut aussi se demander si Virgin Galactic parviendra à honorer ses prestations de tourisme spatial. La compagnie fondée par le patron de Virgin, Richard Branson, a capitalisé sur le succès de Scaled Composites. Cette société californienne avait conçu Spaceship One, un engin en forme d'avion avec un pilote à bord, qui a réalisé le 21 juin 2004 le premier vol spatial habité privé. Spatial… mais pas orbital ! L'engin est porté par un avion en haute altitude, puis s'en détache pour effectuer une parabole culminant à 100 kilomètres avant de revenir sur Terre.

Son successeur, Spaceship Two, emmènera six passagers expérimenter, lors d'un vol similaire, cinq minutes d'impesanteur. Le 29 avril dernier, le moteur fusée de l'engin a été testé avec succès. Selon Virgin Galactic, les premiers heureux élus (ils sont déjà 500 à avoir réservé) devraient décoller à la fin de l'année, moyennant un billet à… 190 000 euros. **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**

Mars

En quête d'une vie passée

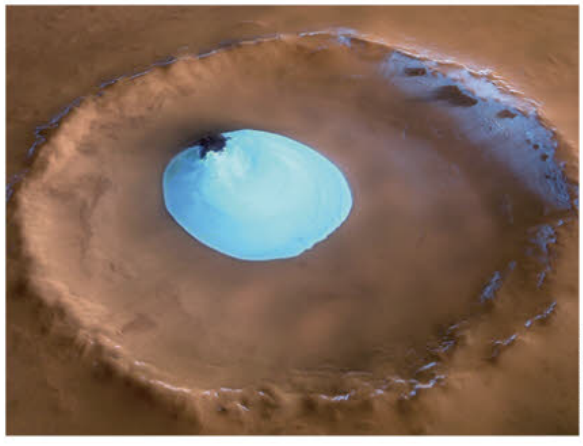
LA PLANÈTE ROUGE a-t-elle un jour abrité la vie ? Cette vie pourrait-elle encore s'y cacher ? Depuis son « amarsissage » le 6 août 2012, le rover Curiosity de la Nasa accumule les preuves que l'eau, indispensable à la vie, a été présente sur Mars.

La prochaine étape sera d'y découvrir de la matière organique, c'est-à-dire formée des éléments carbone, hydrogène, oxygène et azote. Une condition nécessaire à la vie. Curiosity y parviendra peut-être, mais c'est surtout l'un des objectifs de la future mission Exomars. Le 17 juin dernier, au salon aéronautique du Bourget, l'Agence spatiale européenne a signé le contrat industriel final des deux éléments de cette mission, réalisée en partenariat avec la Russie.

Tout d'abord, en 2016, la sonde TGO (Trace Gas Orbiter) ira se placer en orbite martienne. Elle analysera l'atmosphère de Mars dans un double objectif : comprendre pourquoi la plus grande partie de cette atmosphère a disparu ; et tenter de détecter des gaz, dont le méthane, qui pourraient résulter de l'activité métabolique d'organismes vivants.

Par la suite, en 2018, un rover européen sera déposé sur la planète rouge par un module de descente russe. Il sera notamment muni d'une foreuse capable de percer le sol martien jusqu'à deux mètres de profondeur. Là où les molécules organiques devraient être bien mieux préservées qu'à la surface de Mars, très oxydante, qui les détruit. Les échantillons recueillis seront analysés par le laboratoire automatisé embarqué dans le rover.

Outre-Atlantique, la Nasa s'active, elle aussi. Dans quelques années, elle lancera Mars 2020, un engin quasi identique au rover Curiosity, mais doté d'instruments plus orientés vers la recherche de « formes de vie passées » (traces fossiles, matière organique) dans les formations géologiques. Le rover stockera aussi une trentaine d'échantillons dans un conteneur… qui pourrait être rapporté sur Terre par une mission ultérieure. **J.-F. H.**



Lac d'eau glacée dans le Vastitas Borealis Crater de Mars.

ESA/DLR/FU BERLIN

WEB TOUS LES TERRIENS BIENTÔT CONNECTÉS

EUTELSAT

ILS SE NOMMENT O3B pour « Other 3 billion » : les trois milliards de personnes sur Terre qui accèdent difficilement à Internet. Lancés à Kourou le 26 juin dernier, les quatre satellites O3b sont les premiers d'une constellation qui devrait rendre la toile accessible à 180 pays numériquement défavorisés. L'idée est à mettre au crédit de l'Américain Greg Wyler, fondateur de la société O3b Networks. Dans les pays concernés, faute de moyens ou d'infrastructures, les câbles téléphoniques et la fibre optique sont difficiles à déployer. Quant aux satellites de communication haut débit, ils sont volumineux et chers. Placés sur une orbite « moyenne », à 8 000 kilomètres d'altitude, et pesant seulement 650 kg, les petits satellites O3b nécessitent beaucoup moins d'énergie au lancement et moins de puissance pour leurs émetteurs, puisqu'ils se trouvent plus près de la Terre. Inconvénient : ils tournent plus rapidement que notre planète, et ne peuvent donc couvrir la même région du globe en permanence. Voilà pourquoi quatre satellites supplémentaires devaient être lancés en septembre. A terme, ils pourraient être jusqu'à 120. Leur orbite équatoriale assurera une couverture optimale des zones concernées : Afrique, Amérique latine, Proche-Orient, Asie du Sud-Est et Océanie. **J.-F. H.**

Nouveaux matériaux

Les promesses du graphène

Un milliard d'euros : c'est le montant débloqué par l'Union européenne pour imaginer des applications à ce matériau qui fascine les scientifiques.

« *Un matériau miracle* » ! C'est par ces termes que beaucoup de scientifiques désignent le graphène, tant ils s'enthousiasment pour cette substance aux propriétés extraordinaires. Flexible, transparent, meilleur conducteur thermique que le cuivre, 100 à 300 fois plus résistant que l'acier, le plus performant des conducteurs électriques laisse entrevoir de nombreuses applications. Un matériau si prometteur que l'Union européenne vient d'accorder un milliard d'euros sur dix ans au projet Graphène : porté par 126 groupes de recherche académiques ou industriels (dont 15 français) provenant de 17 pays européens, il a précisément pour but de développer ces applications.

Découverte à l'université de Manchester il y a moins de dix ans, en 2004, par les physiciens Andre Geim et Konstantin Novoselov (récompensés en 2010 par le prix Nobel), la molécule miracle est pourtant issue d'un matériau des plus banals, le graphite, celui de nos mines de crayon. Et la méthode des deux physiciens fut tout aussi triviale : ils ont effeuillé ce graphite avec un morceau de scotch jusqu'à obtenir une feuille d'un seul atome d'épaisseur, le graphène. Les atomes de carbone y adoptent une structure en nid d'abeille, comme un grillage aux motifs hexagonaux. Depuis cette découverte, c'est la ruée : les chercheurs rivalisent pour découvrir des propriétés à ce matériau, inventer des méthodes de production pour un graphène de haute qualité ou à bas coût et imaginer des applications. Comme les électrons sont cent fois plus mobiles dans le graphène que dans les meilleurs semi-conducteurs connus, c'est un matériau de choix pour l'électronique rapide. En ligne de mire : des télécommunications à plus haut débit, des radars à bas coût, ou encore la production d'ondes à fréquence très élevée, de l'ordre du térahertz (THz), utilisées par exemple pour des scanners corporels dans les aéroports.

Cependant, le graphène a un handicap : il est conducteur. On ne peut donc jamais y interrompre totalement la circulation des électrons. Par conséquent, un dispositif au graphène consomme continûment de l'énergie. Il est donc plus adapté aux systèmes de communication sans fil (Wi-Fi) qu'aux ordinateurs. Mais il peut très bien s'intégrer aux composants électroniques actuels, ce qui permet de l'envisager comme conducteur à la place du cuivre.

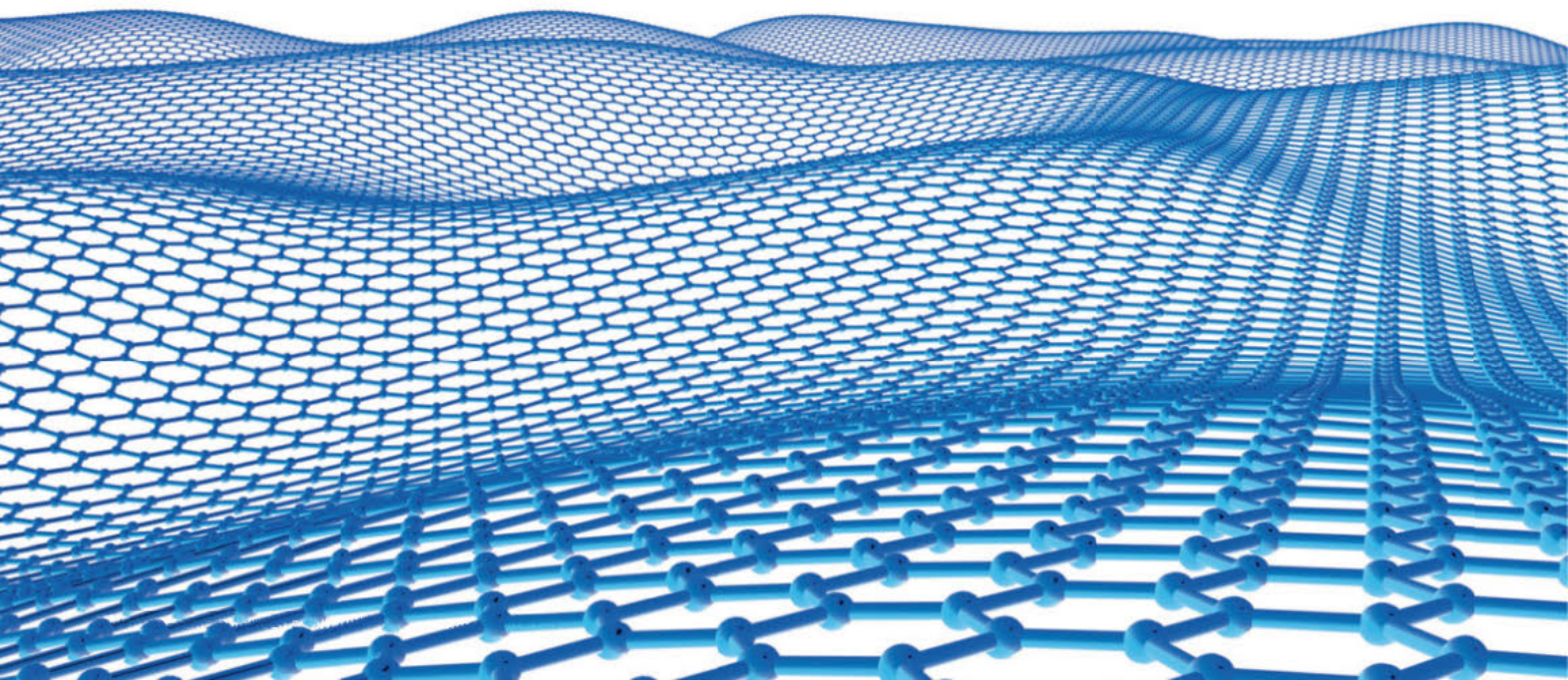
La combinaison des nombreuses propriétés du graphène lui ouvre d'autres territoires. Souple et transparent, il est idéal pour la fabrication de cellules photovoltaïques ou d'écrans adaptés aux livres électroniques pliables. Dans le domaine médical, certains imaginent déjà des rétines artificielles à base de graphène, ou encore des détecteurs de cellules cancéreuses ou d'agents pathogènes.

Découvert sur le Vieux Continent, le graphène offre une magnifique occasion aux industriels européens de retrouver une partie du leadership technologique perdu au profit des Asiatiques ou des Américains. Saisiront-ils leur chance ?

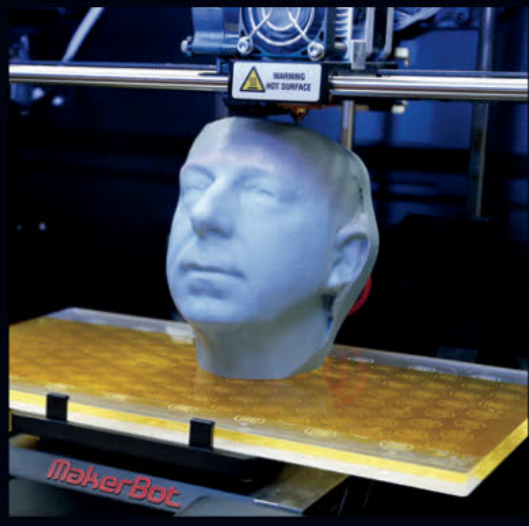
CÉCILE MICHAUT

JIHHE HONG

La souplesse du graphène (vu ci-dessous à l'échelle moléculaire) en fait un matériau idéal pour les écrans tactiles flexibles – et incassables ! – de nos futurs tablettes ou téléphones.



SPLICOSMOS



FABRIZIO BENSCH/REUTERS

3D DRÔLES D'IMPRESSIONS

PAS UNE SEMAINE ne passe sans l'annonce d'un nouvel exploit réalisé par une imprimante 3D : ici un fusil automatique pour fanatique des armes, là un gâteau avec ses décorations, quand ce n'est pas un projet de base lunaire à imprimer sur place ! Ces nouveaux outils ont été popularisés en 2006, avec l'apparition de la RepRap, imprimante tridimensionnelle conçue pour être autoréplicative, c'est-à-dire capable de produire les composants d'une machine qui serait sa copie. Mais il n'était alors question que de la fabrication couche par couche, par dépôt d'un fil de plastique fondu, d'objets conçus à partir d'un modèle 3D sur ordinateur. Aujourd'hui, le concept est le même, mais de nouvelles variantes utilisant toute sorte de matériaux sont apparues. La plus surprenante est probablement l'impression de tissus vivants par dépôt de cellules. De nombreux laboratoires dans le monde planchent sur ces technologies avec l'ambition de fabriquer des organes transplantables : vessie, foie, cœur, os, muscles… Certains y voient déjà la révolution de la médecine régénératrice avec l'avènement de futures usines à organes !

OLIVIER HERTEL

Nanotechnologies

Un grand saut dans l'inconnu

C'EST UN MOTEUR INVISIBLE À L'ŒIL NU, à peine un point au creux de la main… Et pourtant, il tourne ! Formé d'une seule molécule de méthyl-butyl-sulfide déposée sur une surface de cuivre conductrice, le plus petit engin du monde, obtenu par les chercheurs de la Tufts University (Massachusetts, Etats-Unis), a un diamètre d'un nanomètre. Un milliardième de mètre. Mille fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu. Il ouvre la voie à des applications qui relevaient jusque-là de la science-fiction : piloté à distance, il pourrait pénétrer dans les vaisseaux et réparer les dégâts causés par un AVC, ou encore déposer un atome sur une cellule.

Ce moteur est l'une des dernières réalisations engendrées par la « révolution nano » qui s'est imposée en moins de trois décennies, suivant la tendance de l'électronique à la miniaturisation et profitant de la découverte de formes inattendues du carbone, comme le fullerène ou le graphène *(lire p. 50)*.

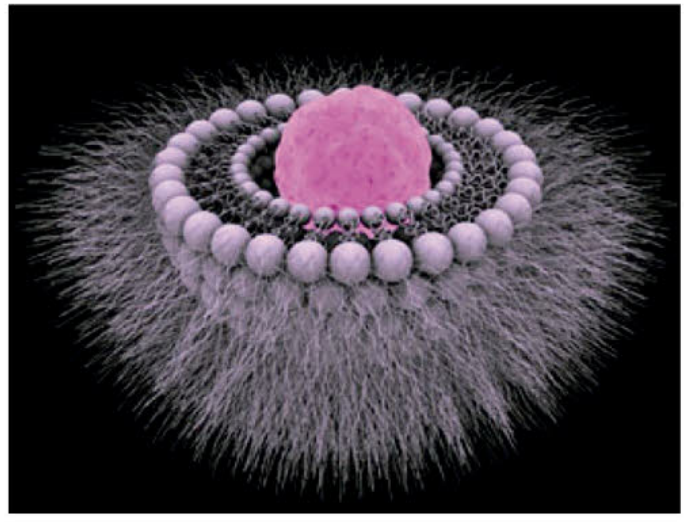
Une révolution qui autorise les chercheurs à fabriquer, assembler et utiliser des structures d'une dizaine d'atomes… Et promet des nanomachines, capteurs-sondes et autres instruments capables de se loger dans les replis du cerveau ou sous la peau, ou encore de former une poussière invisible pour faire inhaler des produits actifs dans le but de guérir… ou de contrôler.

Si cette nano-ingénierie se révèle fascinante, notamment lorsqu'elle est utilisée pour améliorer les performances du vivant ou collecter de l'information, elle ne manque pas d'inquiéter. Et de susciter la polémique. En effet, à l'échelle nanométrique, la matière présente des propriétés physico-chimiques différentes de celles que nous lui connaissons habituellement. D'abord à cause de l'extrême réactivité des nanoparticules. Une masse réduite en particules nanométriques acquiert une surface bien plus importante que si elle formait un seul bloc. Or la réactivité chimique est proportionnelle à la surface de mise en contact. Une expérience de petit déjeuner le montre bien : dans le lait, mieux vaut utiliser du chocolat en poudre qu'en tablette, la grande surface de contact apportée par l'état de particules favorisant la solubilité !

Autre sujet d'inquiétude : la matière adopte, à ces dimensions, un comportement quantique, cette physique étrange qui s'applique au monde subatomique et prévoit qu'une seule particule se trouve dans deux endroits à la fois, ou encore traverse allégrement des barrières infranchissables comme celle d'une membrane cellulaire.

A l'échelle nanométrique, la matière se révèle ainsi sous un jour nouveau… laissant présager un domaine gigantesque à l'interface de plusieurs champs de recherche. Une convergence technologique baptisée NBIC – pour nanotechnologie, biotechnologie, informatique et sciences cognitives – qui promet des réalisations à la fois ambitieuses et inquiétantes : remplacer, notamment, les fonctions vitales défectueuses à cause de la maladie ou de la vieillesse. La perspective de disposer un jour d'un « homme augmenté » et immortel… Pour le meilleur ?

AZAR KHALATBARI



F. CAILLAUD/CNRS PHOTOTHÈQUE/SAGASCIENCE

Un liposome, structure nanométrique de diffusion de médicaments.

Kilooctet= 10^3 octets Mégaoctet=10^6 octets Gigaoctet=10^9 octets

La planète internet

Apparu sur la scène publique il y a à peine vingt ans, le réseau des réseaux s'est développé à une vitesse exponentielle : aujourd'hui, on compte davantage d'appareils connectés que de Terriens!

Câbles

95%

du trafic internet mondial passe par des câbles sous-marins de fibre optique

Câble le plus long
39 000 km
(circonférence de la Terre : 40.000 km)

Réseaux sociaux
Facebook
1,06 milliard de membres actifs
(décembre 2012)
QZone *(Chine)*
712 millions
Tencent Weibo
(microblogging en Chine) :
507 millions
Twitter
200 millions *(actifs)*
Linked In
225 millions
Google+
135 millions
Viadeo
50 millions

Nombre de serveurs Google
(estimation non officielle)
900 000
en 2010
25 000
en 2000

Création de données
90%
des données actuelles ont été créées ces deux dernières années

2,9 trillions
de données sont créées chaque jour
=
5,8 milliards
de disques durs de 500 Go

Nombre mondial de sites Web
698 823 509
en juillet 2013
19 705
en septembre 1995

Le plus grand réseau du monde
Chinanet Backbone
116 932 576
adresses IP

1965
Premier réseau informatique étendu : un ordinateur TX-2 du MIT, sur la côte Est américaine, communique avec un ordinateur Q-32 à Santa Monica, sur la côte Ouest, via une ligne téléphonique.

1969
Lancement du réseau arpanet, ancêtre d'internet.

1971
Le signe @ est utilisé pour créer des adresses de courrier électronique.

1983
Adoption du protocole de transfert de données TCP/IP, qui donne naissance à internet.

Téraoctet=10^{12} octets Pétaooctet=10^{15} octets Exaoctet=10^{18} octets

Chiffre d'affaires des principaux sites

En 2012, en milliards de dollars

Trafic internet

En 2012

6 Go/individu/mois = un peu moins de 1 DVD double couche

En 2030

100 Go/individu/mois = plus de 11 DVD double couche

Trafic internet par type d'activité

En 2012

Vidéo **56%**

Partage de fichiers **25%**

Web, e-mail **18%**

Voix sur IP **1%**

Utilisateurs d'internet

Data centers

2% des émissions de carbone dans le monde

30% de leur consommation d'énergie est consacrée au refroidissement des machines

1,4% de l'électricité mondiale est consommée par les data centers

500 000 data centers dans le monde =

En France, les data centers engloutissent **9%** de l'électricité

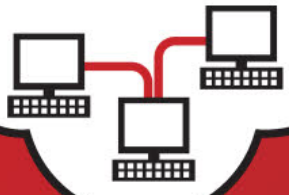
l'équivalent de la production de

30 centrales nucléaires

35% de la population mondiale utilisait internet en 2012, soit 2,5 milliards de personnes

12 milliards

d'appareils sont connectés en réseau soit 1,6 par Terrien



PAGE RÉALISÉE PAR ARNAUD DEVILLARD
INFOGRAPHIE : MEHDI BENYEZZAR

Sept dates clefs pour une naissance

1989
Tim Berners-Lee, au Cern, propose de naviguer sur internet par liens hypertextes : c'est le World Wide Web, internet tel qu'on le connaît aujourd'hui.

1990
Première page et premier navigateur web.

1993
Le Cern met dans le domaine public les technologies et logiciels à la base du World Wide Web : internet quitte le seul monde de la recherche pour s'ouvrir au grand public.

Interview

Viktor Mayer-Schönberger, professeur de nouvelles technologies

« Le déluge numérique va bouleverser nos vies »

Données de toute sorte accumulées par milliards de milliards, les *big data* transformeront jusqu'à nos façons de vivre et de penser.

Vous dites que ce sont les sciences comme l'astronomie et la génomique qui, les premières, ont expérimenté l'explosion des données. Que s'est-il passé ?

Les sciences naturelles ont toujours eu besoin d'accumuler des données, mais la tâche était difficile. Cela a changé au début des années 2000 : les détecteurs sont devenus beaucoup plus sensibles, les capacités de stockage ont augmenté, la puissance de traitement des données a explosé. Il est devenu possible d'en accumuler très rapidement de gigantesques quantités. L'astronomie a été un des premiers domaines à en profiter. Lancée en l'an 2000, la surveillance systématique du ciel par le télescope de la Sloan Digital Sky Survey, au Nouveau-Mexique, a recueilli en deux semaines de fonctionnement davantage de données qu'il n'y en avait eu dans toute l'histoire de l'astronomie.

Des données qu'il faut stocker et traiter…

Là aussi, la mutation a été très importante. Entre ici en jeu la fameuse « loi » de Moore, l'observation que la densité des circuits intégrés croît si vite qu'elle double tous les dix-huit mois. En gros, la puissance de traitement double pendant ce laps de temps. Mais ce qui est encore plus intéressant, c'est que nos algorithmes, la façon même de faire nos calculs, se sont améliorés et seraient cent fois plus efficaces qu'il y a vingt ans (1). L'ensemble a eu un effet turbo sur certaines sciences.

> « Chacun de nous dispose de 320 fois plus d'informations que jadis la bibliothèque d'Alexandrie

Les données viennent de multiples sources. Cet ensemble gigantesque va-t-il cesser d'augmenter ?

La quantité d'information double tous les trois ans. En outre, en l'an 2000, seul un bit d'information sur quatre était sous forme numérique, alors que c'est le cas aujourd'hui pour 98 % de l'information.

Plus fort qu'après Gutenberg !

Chacun de nous dispose de 320 fois plus d'informations que jadis la bibliothèque d'Alexandrie… Nous vivons un véritable « moment Gutenberg ». Selon les travaux de l'historienne Elizabeth Eisenstein, après l'invention de l'imprimerie, la quantité d'information disponible en Europe a doublé en cinquante ans, entre 1453 et 1503. Huit millions de livres ont été imprimés, estime-t-elle, davantage que ce que tous les scribes avaient écrit depuis la fondation de Constantinople, douze siècles auparavant. C'est immédiatement après son invention que l'impact de l'imprimerie a été le plus fort.

Qui dispose aujourd'hui du plus grand nombre de données ?

Les grandes entreprises comme Google. Les gouvernements essayent de rester au niveau, mais c'est peu en comparaison. Et les *big data* de ces grandes entreprises leur permettent de découvrir des choses insoupçonnées. On a beaucoup parlé de l'affirmation par Google de sa capacité à prévoir l'épidémie de grippe (article publié dans *Nature* quelques semaines avant l'attaque du virus H1N1 en 2009), mais je vais vous donner un autre exemple. En examinant les requêtes sur internet, des chercheurs de Yahoo et Microsoft ont été capables de découvrir un effet secondaire dû à la prise simultanée de deux médicaments. Les gens qui les avaient absorbés ont eu des maux de tête, des saignements, et ont cherché à se renseigner. Ils n'ont évidemment rien trouvé, puisque cet effet cumulé était inconnu. Mais avec leurs requêtes, ils ont lancé des signaux que les spécialistes ont su analyser. Résultat : Microsoft ou Google en savent plus sur les effets secondaires des médicaments que les compagnies pharmaceutiques !

En quoi cet afflux de données représente-il une révolution ?

La mutation quantitative conduit à une mutation qualitative. Je vais faire une comparaison avec les nanotechnologies. Quand vous descendez de plus en plus dans l'infiniment petit, soudain, ce ne sont plus les forces habituelles, comme la gravitation ou l'électromagnétisme, qui jouent. Ce sont les interactions forte et faible qui décident du comportement des particules. Ici aussi, nous changeons d'échelle et les choses de qualité !

Avec les *big data*, il s'agirait moins d'apprendre à un ordinateur à « penser » comme les humains que de lui donner la capacité de traiter toutes sortes de masses de données. Est-ce un nouveau domaine de la science ?

Le paradigme classique était celui du traitement de données classées, des bases de données construites selon une taxonomie précise. Aujourd'hui, on acquiert des

VIKTOR MAYER-SCHÖNBERGER
Professeur de gouvernance et de régulation internet à l'institut Internet de l'université d'Oxford (Royaume-Uni), il est l'auteur de plus d'une centaine d'articles sur le sujet des *big data* dont, avec Kenneth Cukier, *Big Data. A Revolution that Will Transform How We Live, Work, and Think* (Eamon Dolan/Houghton Mifflin Harcourt, 2013). Parmi ses autres ouvrages (non traduits en français) : *The Virtue of Forgetting in the Digital Age* (Princeton University Press, 2009).

Retrouvez Viktor Mayer-Schönberger sur le site de *Sciences et Avenir*, http://sciav.fr/1bioRor

données de façon exhaustive et, ensuite seulement, on se demande comment les organiser. C'est un changement majeur dans la manière de penser. Nombreux sont les ingénieurs qui ont du mal à comprendre ce nouveau paradigme des « données non structurées (2) ».

Vous utilisez aussi le terme de « désordre » (*messiness* en anglais), de données imprécises et pourtant utilisables. Une nouvelle façon de voir le monde ?

L'entrée dans la physique des probabilités signifie qu'il y a du désordre au vrai sens du mot. Notre monde est désordonné. Le principe d'indétermination nous dit qu'on ne peut pas connaître à la fois la vitesse et la position d'une particule. On ne peut parler qu'en termes de probabilités de présence. Le principe entropique nous dit que ce qui est à un instant *t* sera plus désordonné une seconde plus tard. Autant de phénomènes bien connus des physiciens. Mais il se trouve que ces notions pénètrent aujourd'hui les sciences humaines et sociales. Dans les sciences sociales, on a commencé à compter il y a environ quarante ans. Toujours sur de petits échantillons, choisis avec précision. Et maintenant, il faudrait tout jeter par la fenêtre et accepter grands nombres et désordre. Il y a de quoi être choqué !

Vous dites même que la notion de progrès pourrait être affectée par les *big data* !

Les ensembles de données ne fonctionnent pas selon une logique de causalité, mais seulement de corrélation. Chaque information n'a en elle-même qu'une faible importance, mais quand vous les réunissez toutes, comme pour un puzzle, il vous apparaît soudain quelque chose que vous ne pouviez voir auparavant. Les ensembles de données sont importants pour identifier des choses que l'œil humain n'a pas discernées. Pensez par exemple à ce qu'a découvert Carolyn McGregor (Institut de technologie de l'université de l'Ontario) sur les prématurés. En prenant 1260 données à la seconde (rythme cardiaque, température…), elle s'est aperçue que des moments de stabilité dans l'état du bébé, plutôt qu'une amélioration, révélaient le calme avant la tempête. Ce qui permet d'administrer les médicaments nécessaires un jour plus tôt.

Le problème, c'est lorsqu'on se laisse conduire par les données sans penser qu'il peut y avoir de l'innovation ailleurs. Si Henry Ford. avait fait tourner des algorithmes pour savoir ce que ses clients voulaient, ils lui auraient répondu : « un cheval plus rapide ». Oui, les *big data* peuvent conduire à des innovations, mais seulement si nous laissons toujours jouer son rôle à notre créativité.

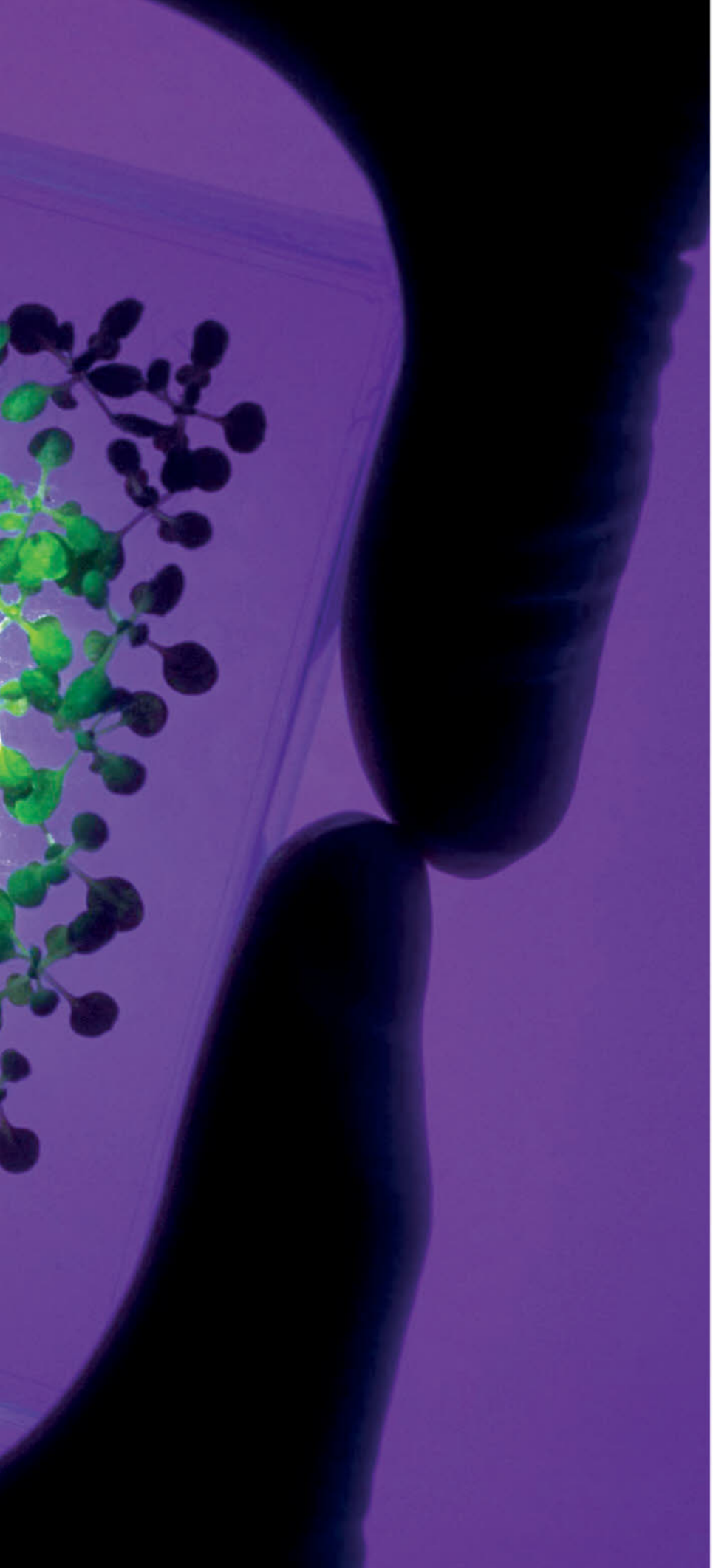
PROPOS RECUEILLIS PAR DOMINIQUE LEGLU

PHOTO : CLAUDIA ZIEGLER/ANZENBERGER POUR SCIENCES ET AVENIR

1. *In* rapport du Bureau américain de la politique scientifique et technologique, décembre 2010.
2. Données complexes qui vont des graphiques aux tableurs en passant par les e-mails, des pages non indexées du Web, etc.

Arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) génétiquement modifiée. Cette petite plante à priori banale est une star des laboratoires. C'est la première dont le génome a été entièrement séquencé en 2000.

L'INTELLIGENCE INSOUPÇONNÉE DES PLANTES



STEVE TAYLOR/SPL/BIOSPHOTO

On les croyait passives. Elles savent se repérer dans l'espace, se défendre de leurs agresseurs, optimiser leurs relations avec les champignons… Les plantes dévoilent peu à peu leurs stratégies.

Nous pensons tout connaître de ces plantes qui nous nourrissent, nous habillent, nous procurent abri et confort. Erreur. Les mécanismes de fonctionnement des végétaux restent largement inconnus. Comment se débrouillent-ils pour reconnaître leur environnement et s'y adapter ? Comment assurent-ils leur équilibre entre croissance aérienne et ancrage dans le sol ? Quelles relations entretiennent-ils avec leurs prédateurs, mais aussi avec leurs organismes symbiotiques ? Autant de questions qui occupent des centaines d'équipes de chercheurs dans le monde entier. Les enjeux sont immenses. Il s'agit ni plus ni moins de définir les nouvelles techniques agronomiques qui permettront d'augmenter les rendements des récoltes tout en diminuant les apports d'engrais et de pesticides. Et d'améliorer la résistance des plantes au changement climatique en cours. Le tout en s'appuyant sur les talents inattendus des végétaux. Revue des découvertes les plus prometteuses explorées par les chercheurs.

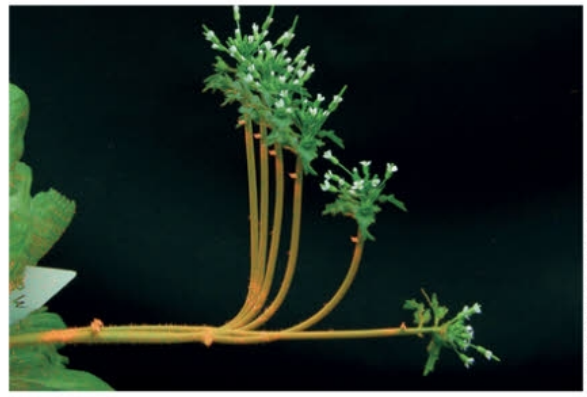
Capables de modifier leur posture

L'idée est encore trop souvent répandue : les plantes seraient des êtres vivants largement inférieurs aux animaux, car incapables de se déplacer ou de se défendre des agressions. Depuis 2000, les biologistes se sont pourtant ●●●

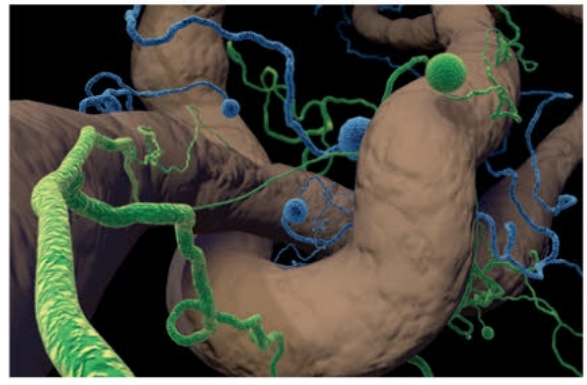
●●● rendu compte que toutes avaient un sens aigu de leur environnement, réfutant la vision d'Aristote qui opposait l'âme végétative à l'âme motrice. Mieux, elles sont *« capables de percevoir leur position, et possèdent une capacité motrice qui leur permet de modifier leur posture »*, affirme Bruno Moulia, directeur de recherche à l'Inra Clermont-Ferrand.

En poussant vers le haut, la plante améliore son accès à la lumière du soleil, sa seule source d'énergie. On pensait jusqu'ici que cette verticalité était due à la gravité terrestre. Mais l'équipe de Bruno Moulia a fait la une des *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* (Pnas) fin 2012 en prouvant qu'une telle croissance *« nécessitait également que la plante ait une "idée" de sa forme à tout moment »*.

Du peuplier à l'arabette en passant par le blé, les chercheurs ont mis en évidence que les végétaux avaient une même façon de se redresser en sortant de terre. *« Les plantes commencent par se courber tout au long de leur axe, puis se redressent progressivement en partant du haut, concentrant petit à petit la partie courbée à la base de la tige*, raconte Bruno Moulia. *Elles ont donc nécessairement une perception de leur inclinaison par rapport à la gravité, mais aussi de la courbure de leur tige, et une tendance à la rectifier. »* Ce résultat devrait s'avérer fort utile dans la lutte contre la « verse du blé », qui voit se coucher les céréales à cause des intempéries ou d'attaques parasitaires. Il pourrait conduire à optimiser par sélection génétique les mécanismes qui permettent à la plante de se redresser naturellement. Ces recherches pourraient également être appliquées aux arbres afin de produire des troncs plus droits.



R. BASTIEN, S. DOUADY, B. MOULIA/INRA



DANA HAMERS SCIENTIFIC ART

Lorsqu'on l'incline à l'horizontale, l'arabette des dames se redresse peu à peu (en haut, photomontage). Quant aux champignons mycorhiziens, ils forment avec les plantes des réseaux complexes pour s'échanger des nutriments.

Expertes en champignons

Les plantes ont beaucoup d'amis qui les aident à pousser. Bactéries, champignons et micro-organismes vivent en parfaite intelligence avec les végétaux depuis leur apparition sur terre, il y a environ 450 millions d'années. Ainsi, 80 % des plantes évoluent en symbiose avec des champignons. Organe privilégié de cette entente cordiale : la mycorhize par laquelle la plante échange sucres et acides aminés produits par la photosynthèse contre des oligo-éléments que le champignon peut aller chercher plus en profondeur que les racines. Mieux ! Les plantes favorisent les champignons qui leur rendent le meilleur service. Une découverte du programme européen Evolution of Cooperation Behaviour of Plants-Symbionts (ECS, université de Rennes I) qui se termine en 2014.

« Pour le prouver, nous avons fourni à une plante un CO_2 contenant un marqueur isotopique, ^{13}C, ce qui a permis de suivre le carbone jusque dans l'organisme des champignons », raconte Philippe Vandenkoornhuyse, l'un des auteurs de l'étude. Cette manipulation a révélé une incroyable faculté : la plante attribue préférentiellement son carbone aux champignons qui lui fournissent le plus de nutriments. En retour, les champignons ne renforcent leurs apports qu'aux racines qui leur transmettent du carbone. Chacun joue donc une partie gagnant-gagnant qui écarte ceux qui voudraient prendre sans donner. Ces relations expliqueraient la longévité de cette symbiose. Voilà qui pourrait amener les agriculteurs à modifier leur usage de nitrates. Avec des

BACTÉRIES, ARCHÉES… LES EXTRÉMISTES DE LA VIE

DE LA VIE PARTOUT ! *« Ses limites, sur Terre, ne sont toujours pas connues »*, assure Mohamed Jebbar, du laboratoire de Microbiologie des environnements extrêmes (université de Bretagne occidentale). Il suffit de chercher pour trouver ! L'équipe bretonne a identifié en 2000 des bactéries et champignons microscopiques dans des sédiments marins au large de la Nouvelle-Zélande, à 1 600 mètres sous le plancher marin ! Le 12 juin 2013, *Nature* rapportait une découverte similaire au large du Pérou. Bactéries, archées (bactéries dépourvues de cellule à noyau) et champignons y pullulent. *« Ces organismes respirent des sulfates provenant des couches géologiques au lieu d'oxygène et jouent un rôle dans le cycle du carbone et de l'azote organique »*, précise William Orsi, de la Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts).

Cette vie dans les sédiments représente le nouvel horizon de la recherche sur les habitants des milieux extrêmes.

Son exploration succède à celle des incroyables animaux des sources hydrothermales découvertes en 1977, qui apportent nourriture et conditions de vie favorables à toute une chaîne alimentaire : clams géants, vers tubicoles, crustacés. *« Ces animaux ne vivent plus sous l'influence du rayonnement solaire et se débrouillent avec le peu de*

AGE FOTOSTOCK

Cyanobactéries thermophiles dans le parc de Yellowstone.

ANTOINE DEVOULARD/REA

apports trop importants d'engrais, les cultures risquent en effet de se détacher d'un mutualisme dont elles tirent pourtant leur vigueur. Et favoriser les champignons tricheurs, entraînant une baisse de fertilité des sols.

Les plantes sont en première ligne face au changement climatique. Ici, un chercheur analyse la croissance du maïs sous stress environnemental.

En symbiose avec les bactéries

Paul Schulze-Lefert, de l'institut Max-Planck (Allemagne), s'intéresse de près aux bactéries. Directeur du département des Interactions plantes-microbes et véritable vedette au sein de la communauté internationale des biologistes, il a montré que certains microbiotes (ensembles de micro-organismes vivant sur les racines comprenant bactéries et champignons microscopiques) favorisaient la vigueur des végétaux selon des mécanismes symbiotiques similaires à ceux des champignons. En avril 2013, une start-up américaine, AgBiome, dont Schulze-Lefert est conseiller, a levé 14,5 millions de dollars de capitaux pour proposer aux agriculteurs cette nouvelle méthode de protection de leurs récoltes.

À l'université de Nottingham (Grande-Bretagne), on creuse un sillon voisin. L'équipe d'Edward Cocking a en effet isolé une bactérie présente sur la canne à sucre qui fixe l'azote de l'air. Or, cette bactérie semble pouvoir s'adapter à toutes les grandes cultures. *« Cette nouvelle technologie peut fournir l'essentiel de l'azote dont les plantes ont besoin »*, assure l'équipe, dans son annonce du 25 juillet dernier. De quoi se passer d'engrais chimiques ! Très discrets sur les caractéristiques de ce micro-organisme, les chercheurs affirment cependant que la bactérie pourrait être introduite directement dans les semences.

Equipées d'armes de résistance

Les plantes ont aussi beaucoup d'ennemis. Des organismes pathogènes, certes, mais surtout la météo. Selon la FAO, l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, la moitié des récoltes mondiales est perdue à cause du manque d'eau, de la chaleur ou du sel, contre 20 % « seulement » à cause des insectes et champignons. *« Deux axes de recherche s'imposent donc, l'un sur l'amélioration des mécanismes de défense des plantes, l'autre sur les processus de protection développés par des espèces vivant en milieu extrême »*, expose Heribert Hirt, directeur de l'unité de recherche en Génomique végétale d'Evry (Inra/CNRS). ●●●

résidus carbonés descendant de la surface, explique Mohamed Jebbar. *Le record de profondeur vient de tomber à 5 000 mètres avec une source située au large des îles Caïmans.* » Le professeur Jebbar voue une admiration particulière à une archébactérie, *Pyrococcus yayanosii,* qui s'épanouit entre 85 et 105 °C et se divise entre 500 et 1 200 bars de pression !

Sur terre, les sources chaudes du parc national de Yosemite (États-Unis) ont longtemps représenté « le » réservoir de bactéries évoluant en milieu brûlant. Mais les chercheurs vont désormais vérifier la présence de vie dans les zones les plus éloignées. Ainsi, en 2012, Steven Schmidt et Ryan Lynch, de l'université du Colorado, ont collecté des archées et des champignons sur les pentes des volcans de l'Atacama (Chili), à plus de 6 000 mètres d'altitude. Ils y vivent sous un taux de rayonnement UV double de celui du niveau de la mer, avec des températures allant juqu'à +56 °C le jour, -10 °C la nuit.

L'étude de ces milieux si éloignés du nôtre pourra peut-être permettre d'expliquer comment la vie est apparue sur Terre. Plus prosaïquement, note l'Ifremer, ces organismes sont dotés d'enzymes insensibles à la chaleur et aptes à fonctionner dans des réacteurs sous pression. D'où l'idée de les utiliser dans des procédés industriels, notamment en chimie fine, dans le domaine de la pharmacie, des matériaux spéciaux, ou encore pour la fabrication de composites ultra-résistants.

●●● Ce laboratoire s'intéresse de près à la Mitogen-activated protein kinase, une protéine qui est le principal mécanisme de protection des végétaux. Elle désactive l'effet de l'agent pathogène, à la manière d'un interrupteur. Il faudrait donc la faire agir à volonté quand un champignon ou un insecte vient agresser la culture. On y parvient aujourd'hui en laboratoire, mais sans pouvoir en doser les effets. Résultat : la plante ne fait que se défendre… et en oublie de remplir ses fonctions de croissance et de reproduction.

Heribert Hirt parcourt par ailleurs le monde à la recherche des secrets des plantes vivant dans des milieux extrêmes *(lire l'encadré p. 56)*. *« Nous devons décrire leurs mécanismes d'adaptation et déterminer les zones d'intérêt de l'ADN, pour envisager ensuite de doter les grandes cultures de ces qualités agronomiques »*, résume le chercheur. La communauté scientifique s'intéresse ainsi beaucoup à *Dichanthelium lanuginosum*, une herbe toute simple qui vit à proximité des sources géothermales du parc national américain de Yellowstone et supporte des températures supérieures à 65 °C. *« Sans symbiose avec ses microbes, cette plante ne pourrait tolérer plus de 38 °C,* confie Heribert Hirt. *Nous avons pu décrire des interactions. Et ainsi comprendre que c'est la bactérie* Curvularia protuberata *qui confère à l'herbe une telle résistance à la chaleur. »*

Le laboratoire de Biométrie et de Biologie évolutive (LBBE, Lyon I) s'inscrit dans cette démarche au sein d'un consortium international mené par des chercheurs canadiens. L'équipe a séquencé le génome de plusieurs espèces de brassicacées, une large famille de plantes comprenant notamment le colza, le chou, la moutarde et le navet. Plus de 90 000 régions génomiques, qui jouent vraisemblablement d'importants rôles dans l'activation des gènes de réponse à des modifications de température par exemple, ont été identifiées. Cette « carte » a été publiée en juin dernier, et les équipes de l'université de Toronto et de McGill à Montréal identifient actuellement les régions génomiques qui permettraient d'aider les récoltes à supporter le changement climatique.

AMERICAN CHEMICAL SOCIETY

Premières feuilles artificielles capables de fabriquer de l'énergie par photosynthèse.

Le site du laboratoire de la science des plantes de l'Inra: https://www6.inra.fr/saclay-plant-sciences

Car le grand défi de l'agriculture du XXIe siècle sera de s'adapter à une planète plus chaude. Agronomes et généticiens prévoient en effet d'importants effets délétères sur les végétaux. Dans *Nature Communications* du 31 juillet 2013, Qiong A. Liu (université de Luxembourg) et son équipe publient l'une des premières études concernant les effets d'un taux plus élevé de CO_2 dans l'atmosphère sur le capital génétique des plantes via le modèle *Arabidopsis*. La conclusion est sans appel : cette augmentation va affecter les gènes qui contrôlent la floraison et la multiplication cellulaire. On commence à calculer les conséquences sur la production alimentaire. L'Institut pour la recherche et le développement (IRD) prévoit ainsi que les récoltes de sorgho en Afrique pourraient diminuer de 41 % du fait d'un stress hydrique.

Bonnes en calcul

L'équipe de Martin Howard du John Innes Center (Grande-Bretagne) vient de résoudre une véritable énigme. Comment les plantes font-elles pour ne pas mourir de faim la nuit ? Pour se nourrir, les végétaux utilisent en effet le soleil afin de convertir le CO_2 de l'atmosphère en sucres et amidons. La photosynthèse n'est évidemment pas possible la nuit, alors que la plante doit continuer à assurer toutes ses fonctions biologiques. *« Pour résoudre cette difficulté, les plantes comptent »*, affirme Martin Howard dans le journal *e.Life* de juin 2013. Toujours en s'appuyant sur l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*, l'équivalent végétal du rat de laboratoire), les chercheurs ont en effet déterminé que les plantes ont une capacité d'évaluation et stockent dans la journée de quoi passer la nuit.

Cette restitution alimentaire ne se fait pas n'importe comment. En variant les périodes de luminosité, l'équipe a démontré qu'elles consommaient invariablement en une journée 95 % de la nourriture ingérée. Durant la nuit, des mécanismes moléculaires internes aux feuilles mesurent l'état du stock d'amidon et estiment le temps restant jusqu'à l'aube. Le calcul du temps relève d'une horloge interne similaire à celle des humains. *« Le stock d'amidon disponible est divisé par la durée de temps jusqu'à l'aube afin de parvenir au taux correct de consommation »*, précise Martin Howard. Le risque d'une petite faim nocturne est ainsi écarté. Une meilleure compréhension de ces mécanismes ouvre de réelles perspectives d'amélioration des rendements. Certains chercheurs rêvent ainsi du jour où les plantes pourront stocker davantage de nutriments le jour pour en consommer plus la nuit, et ainsi croître plus vite et plus vigoureusement.

Nombreux sont ceux qui fantasment également sur la photosynthèse. Au cœur des cellules végétales, des assemblages complexes de protéines fabriquent du glucose à partir du CO_2 de l'air, et produisent en même temps l'oxygène de l'atmosphère en oxydant l'eau. Chaque étape est remarquablement optimisée : absorption de la lumière, production d'électrons, transport de ces électrons vers les centres où s'effectue la synthèse des sucres. Si le mécanisme est bien connu, il est à ce jour impossible de le reconstituer. En 2011, l'équipe de Daniel Nocera (MIT) est parvenue à créer une « feuille artificielle » sans pour autant résoudre les questions de transport et de stockage. Qu'on fasse sauter ces verrous technologiques, et l'Humanité aura réglé pour toujours ses problèmes énergétiques !

LOÏC CHAUVEAU

Espèces marines

Curieuses rencontres dans les abysses

Chaque année, des milliers d'espèces marines sont inventoriées. Sur des millions encore à découvrir...

Il y a quelques mois, les équipes du Muséum national d'histoire naturelle posaient leurs bagages après deux mois d'exploration des eaux de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Les lourdes malles de la mission « Planète revisitée » contenaient un trésor : conservées dans l'éthanol, 400 espèces de coraux, 1 450 de crustacés décapodes, 4 500 de mollusques, 320 d'échinodermes, 1 300 de poissons et 300 d'algues. Parmi les vedettes, un crabe poilu, inconnu au bataillon, comme bien d'autres animaux marins récoltés pour la plupart la nuit au cœur du Triangle de Corail, région abritant la plus grande biodiversité marine du monde. Les chercheurs ont estimé que 500 à 1 000 des espèces qui composent leur butin sont probablement inconnues de la science. Il faudra plusieurs années pour connaître les noms des nouveaux venus dans les collections du Muséum.

Chaque année sont ainsi décrites environ 1 600 « nouvelles » espèces, du picoplancton aux baleines. *« Et pour cause : l'exploration du système marin, et des milieux profonds en particulier, est récente,* explique Sarah Samadi, professeur au Muséum. *Sans compter que de nouveaux outils comme le séquençage ADN nous permettent de mieux analyser ce que nous rapportons. »* Une récente étude de la commission Océan de l'Unesco estime que 226 000 espèces marines sont connues, sur un total probable de 700 000 à un million. Certains scientifiques, avec une autre méthode de calcul, avancent même le nombre de 100 millions.

Parmi les plus de 8000 espèces dénichées par la mission «Planète revisitée» dans les eaux de Papouasie-Nouvelle-Guinée : 1. Crabe du genre *Banareia*. 2. Gastéropode *Calpurnus verrucosus*. 3. Crustacé stomatopode *Odontodactylus scyllarus*. 4. Micro-gastéropode marin de la famille des Cystiscidae.

Il faudra 1000 ans !

Les chercheurs s'accordent à dire que certains groupes, méconnus et délaissés jusqu'à il y a peu, seront probablement une corne d'abondance. *« On estime que lorsqu'on fait un prélèvement de sédiments en milieu profond, entre 50 et 90 % des espèces récoltées sont nouvelles »*, explique Lénaïck Menot, chercheur à l'Ifremer Bretagne. En moyenne, le laps de temps entre la récolte et la publication scientifique consacrée à une nouvelle espèce s'établit à vingt et un ans. *« S'il nous en reste près de deux millions à découvrir, au rythme actuel de description et d'identification, il faudra 1 000 ans ! »*, lance Lénaïck Menot. En cause, la rareté des taxonomistes. Les scientifiques récoltent plus que ce que la communauté mondiale est capable d'étudier. Pas de raison pour autant de lever le pied. Les chercheurs en sont convaincus : il faut conserver les échantillons et essayer de réduire le temps d'attente sur les étagères.

« Certains écosystèmes très riches vont subir un jour ou l'autre de grosses pressions : nous avons les moyens techniques d'essayer d'évaluer les richesses sous-marines avant qu'elles ne soient menacées », explique Sarah Samadi, évoquant les ressources minérales des milieux profonds qui attireront inévitablement l'appétit des humains. Connaissance et préservation sont d'ailleurs parfois d'une utilité immédiate. En trente ans d'exploration, plus de 300 substances intéressant la médecine ont été identifiées dans la faune sous-marine de la Nouvelle-Calédonie. Les gymnochromes, pigments d'un échinoderme que l'on pensait disparu il y a 140 millions d'années, se sont ainsi révélés les premières molécules inhibant la réplication du virus de la dengue. **CÉCILE CAZENAVE**

EN HAUT : A. ANKER – EN BAS, DE GAUCHE À DROITE : L. CHARLES - TIN-YAM CHAN - L.CHARLES / MNHN/PNI/IRD

Interview

Pierre-Henri Gouyon, généticien

« Il faut remettre en route le moteur de la biodiversité »

Des espèces apparaissent, d'autres s'éteignent… Pour ne plus appauvrir son milieu, l'homme doit accompagner cette dynamique naturelle et non construire des arches de Noé.

Cela a-t-il encore un sens, aujourd'hui, de mener l'inventaire des espèces de la planète ?

La découverte d'une nouvelle espèce de grenouilles dans une contrée lointaine ne va peut-être pas changer grand-chose. Toutefois, il est évident que si l'on veut comprendre ce monde, il faut étudier ce qui existe. Sans d'ailleurs rechercher une utilité immédiate. La pervenche de Madagascar, décrite au XVIIe siècle, s'est révélée une arme dans le traitement du cancer. Mais aujourd'hui, il ne s'agit pas seulement d'inventorier et de classer les espèces, c'est-à-dire d'en établir la taxonomie, mais aussi de comprendre les relations entre les organismes, vivants *et* fossiles, et les mécanismes de l'évolution à l'œuvre.

Sur quels progrès s'appuie la connaissance des espèces naturelles ?

L'informatique a accéléré et bouleversé ce chantier titanesque qu'est l'inventaire raisonné du vivant. Il y a une énorme masse de données à stocker, classer, mettre en commun, des arbres phylogénétiques à construire. Les scientifiques travaillent avec de puissants logiciels, des modèles, et en réseau… Gain de temps et partage des connaissances ! Ainsi, le grand herbier du Muséum national d'histoire naturelle a été entièrement rénové, de nombreux échantillons ont été numérisés et mis en ligne, ce qui en fait le premier herbier virtuel au monde.

> « Pour préserver les pandas, ne les enfermons pas dans des réserves, mais protégeons les bambouseraies

Par ailleurs, les techniques de séquençage ont réalisé un véritable bond en avant, permettant de séquencer à tour de bras des multitudes de bouts de génome. C'est une aide précieuse à la métagénomique, c'est-à-dire l'étude de l'ensemble des génomes d'un environnement complexe (océan, sol, intestin…) et de leurs interactions. Génomes et satellites nous donnent une vision globale, nous aident à comprendre ce que nous sommes dans un système mouvant et complexe.

Vous dites souvent que l'espèce n'est pas la bonne unité pour mesurer la biodiversité. Pourquoi ?

La biodiversité ne se résume pas à un catalogue d'espèces ! Cette vision, fixiste, est une survivance du XVIIIe siècle. Il est bien sûr légitime, face aux disparitions massives, de tenter de sauver ce qui peut l'être. Toutefois, si l'on veut réellement préserver les pandas, la solution n'est pas de les enfermer en surnombre dans des réserves, mais de protéger de larges portions de bambouseraies et de territoires qui profiteront d'ailleurs à tout un écosystème. La biodiversité doit être comprise comme un processus dynamique d'émergences et d'extinctions. Ce point de vue change radicalement non seulement ce que l'on étudie et ce que l'on cherche à préserver, mais aussi nos raisons de le faire, puisqu'il ne s'agit plus de fabriquer des arches de Noé. Aujourd'hui, c'est toute la dynamique du système qui semble être perturbée. Notre action sur la biosphère ne se résume pas à accélérer la disparition d'espèces ; elle semble bel et bien avoir modifié les paramètres dynamiques des systèmes vivants dans le sens d'une décroissance. Voilà un gain de connaissance du XXe siècle : nous avons compris que nous avons cassé le moteur de la biodiversité.

Pouvez-vous préciser de quelle façon les *Homo sapiens* sont responsables ?

Par la globalisation des échanges et la fragmentation des habitats. Nous transportons chaque jour un nombre effarant d'organismes sur de longues distances : semences, insectes, algues mais aussi bactéries ou virus, ce qui induit du parasitisme, de la compétition, de la prédation… Dans le même temps, nous construisons des autoroutes, des villes, qui sont autant d'obstacles aux échanges naturels entre individus de nombreuses populations végétales et animales.

Cet isolement imposé aux populations conduit à leur appauvrissement génétique et les rend incapables d'évoluer. En outre, chacune d'entre elles, si elle s'éteint, a peu de chances d'être refondée par des individus voisins. Car la plupart des espèces sont constituées d'un ensemble de populations dont chacune peut s'éteindre et dont l'ensemble ne se maintient que grâce aux recolonisations dues à l'arrivée de migrants dans les territoires laissés vacants.

Avons-nous des moyens d'enrayer la crise ?

Nous avons noté, entre autres, qu'avec le réchauffement climatique, de nombreuses espèces ne peuvent se

PIERRE-HENRI GOUYON, professeur en Systématique et évolution au Muséum national d'histoire naturelle de Paris, a dirigé le laboratoire Evolution et systématique des végétaux de l'université Paris-Sud Orsay. Il a écrit *Génétique et évolution* (Gallimard/CNRS, 2007) et, en collaboration avec Miguel Benasayag, *Fabriquer le vivant* (La Découverte, 2012).

Herbarium reloaded, un web documentaire sur l'Herbier du Muséum en quarante épisodes vidéo et photo signé Anne-France Sion, Vincent Gaullier et Carlos Muñoz Yagüe. Mise en ligne en novembre 2013 : http://vimeo.com/groups/197742/videos/67382655

maintenir qu'en se déplaçant vers le nord. Or, ces déplacements sont interdits non seulement par les infrastructures, mais aussi par le fait que nous attribuons à chaque zone une destination qui n'est pas prévue pour évoluer en fonction des conditions : ici une forêt, là des champs ou une ville… Face à l'ampleur du problème, la mise en place de quelques crapauducs reste insuffisante. On pourrait remettre le moteur de la biodiversité en marche en reconnectant les forêts et les rivières, ainsi que toutes les zones naturelles, via des corridors intégrés dans chaque projet d'aménagement. C'est le projet de trames bleues et vertes qui a été défendu lors du Grenelle de l'Environnement.

En quoi le fait que d'autres espèces ne puissent plus évoluer nous concerne-t-il ?

L'exemple le plus frappant est celui des semences par lesquelles nous reproduisons les plantes qui nous sont le plus nécessaires, car à la base de notre alimentation. En quelques centaines de millions d'années, le processus évolutif a produit une multitude de formes dont chacune possède des potentialités évolutives importantes. Pendant des milliers d'années, les paysans du monde entier ont cultivé certaines des plantes issues de ce processus et en ont encore augmenté la diversité. Ces ressources génétiques nous sont précieuses. C'est sur elles que reposent les possibilités de sélection future. Sélection qui permettra d'augmenter les potentialités des plantes, de mieux répondre à nos besoins, de faire en sorte qu'elles résistent à différentes contraintes (maladies, sécheresse, etc.). Or, nous exploitons cette diversité sans la maintenir : nous consommons toute leur production. Une poignée de sélectionneurs et de semenciers déposent des brevets et interdisent aux paysans de resemer. La diminution de la diversité des variétés cultivées à l'échelle de la planète est vertigineuse.

Mais ne fabriquons-nous pas de nouvelles espèces – ou plutôt variétés – dans nos laboratoires ?

Soyons lucides : nous ne pourrons pas reproduire en laboratoire autant de diversité génétique que par la sélection naturelle ou dans les champs. Et il est insuffisant de « congeler » la biodiversité, c'est-à-dire de la conserver dans des banques de graines, d'immenses réfrigérateurs souterrains, comme c'est déjà le cas au Svalbard, un archipel de Norvège. Il est désormais urgent de remettre en route le processus dynamique de génération de biodiversité. De nouveaux défis scientifiques s'ouvrent. Au XX^{e} siècle, le monde était vu comme un grand jeu de Légo dont on pouvait échanger les morceaux sans se préoccuper de la façon dont ils interagissaient avec le reste. Il faut désormais aborder tous les écosystèmes – y compris celui du corps humain – dans leur complexité et leurs interactions.

PROPOS RECUEILLIS PAR RACHEL MULOT

PHOTO : BRUNO CHAROY/PASCO & CO POUR SCIENCES ET AVENIR

Une Terre aux ressources comptées

Emissions mondiales de CO_2

La concentration du CO_2 mesurée à l'observatoire de Mauna Loa (Hawaï) s'accélère.

Durant les années 1960
+1
ppm par an

En 2012
+2,56
parties par million (ppm)

Climat

Température

+0,75°c
au cours du XX^{e} siècle dont 0,55°C depuis les années 1970

Banquise

Au cours des dernières décennies, la banquise, mesurée dans son extension minimale, c'est-à-dire à la fin de l'été, a considérablement diminué en superficie. Elle s'est également amincie.

-50%
de volume en 30 ans

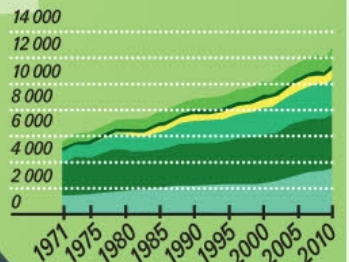
Energie

Depuis 1973, les ressources énergétiques consommées dans le monde ont plus que doublé, passant de 6 107 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) à 12 717 Mtep en 2010. Un tiers de cette énergie primaire est perdue lors des différentes étapes avant sa livraison aux consommateurs sous forme finale, c'est-à-dire utilisable dans leurs équipements. La consommation de cette énergie finale représentait 8 677 Mtep en 2010.

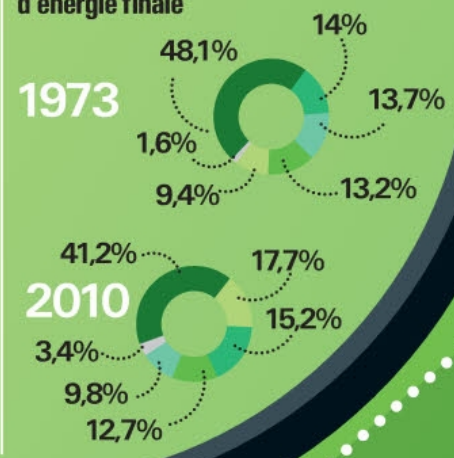
Charbon / tourbe — *Pétrole* — *Gaz naturel* — *Electricité*
Hydraulique — *Biocarburants, déchets* — *Nucléaire* — *Autres*

Approvisionnement mondial en énergie primaire

En Mtep



Consommation mondiale d'énergie finale



Matières premières

+40%

C'est l'augmentation de l'utilisation des matières premières naturelles (biomasse, minéraux, énergies fossiles...) entre 1992 et 2005.

PAGES RÉALISÉES PAR CÉCILE CAZENAVE
INFOGRAPHIES : MEHDI BENYEZZAR

Espèces menacées

La liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) est un indicateur important de l'état de santé de la biodiversité. Sur 64 000 espèces végétales et animales étudiées par l'UICN,

près de 19 000 sont en danger

dont 41% des amphibiens, un quart des mammifères et 13% des oiseaux

Disponibilité en eau renouvelable

Islande	524 691
Brésil	41 865
Equateur	28 938
Etats-Unis	9 802
France	3 343
Chine	2 060
Inde	1 539
Egypte	694
Qatar	31

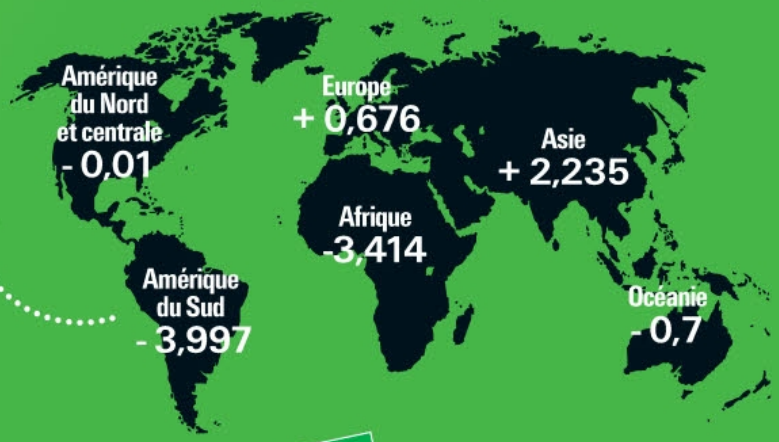
En mètres cubes par habitant et par an

La consommation d'énergie, d'eau et de matières premières alimentaires ne cesse d'augmenter. Tandis que le réchauffement climatique et la pression humaine entraînent une raréfaction des ressources.

Ecosystèmes

Perte ou gain net de forêts

Entre 2000 et 2010, en millions d'hectares par an



Disponibilité alimentaire

Par habitant en kilocalories par jour. Besoins moyens : 2000

	Produits animaux	*Produits végétaux*	*Total*
Europe	925	2 436	3 362
Afrique	207	2 353	2 560
Asie	429	2 277	2 706
Amériques	763	2 242	3 205
Dont Amérique du Nord	1001	2 658	3 659

5,2 millions d'hectares sont perdus chaque année, soit l'équivalent d'un terrain de foot ball à la seconde

1,6 milliard de personnes tirent leurs moyens de subsistance des forêts

108 milliards de dollars par an sont générés par les plantes médicinales en provenance des forêts tropicales

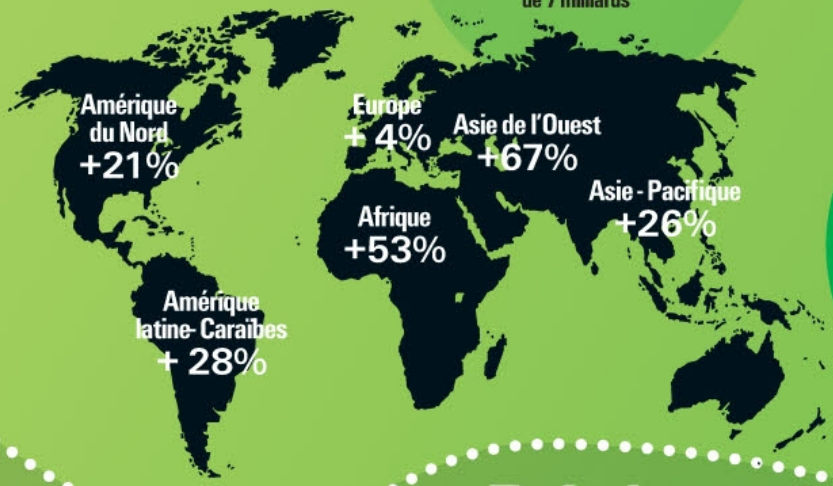
Emissions de CO_2 par habitant

Entre 1992 et 2008, les émissions mondiales de CO_2 sont passées de 22 milliards à plus de 30 milliards de tonnes, soit une hausse de 36%. Cette augmentation est due surtout à la croissance économique de pays comme la Chine, l'Inde ou le Brésil.

Population mondiale

+26%

Entre 1992 et 2010, elle est passée de 5,5 milliards à près de 7 milliards



De plus en plus d'urbains

50%

de la population mondiale est urbaine.

+45%

De 1992 à 2009, la population urbaine est passée de 2,4 milliards à 3,5 milliards de personnes

Déchets

4 milliards de tonnes

en sont produits chaque année dans le monde

Des hommes toujours plus nombreux et urbains

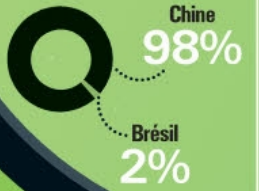
Terres rares

Cérium, europium, néodyme, yttrium... Les terres rares ont permis des innovations technologiques dont la société ne peut plus se passer. Elles sont indispensables à l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, la santé (imagerie), et les technologies de l'information et de la communication. En cas de rupture d'approvisionnement, de nombreux secteurs de l'économie s'effondreraient.

133 260 tonnes

Production mondiale d'oxydes de terres rares en 2010

Part de la production



Réserves mondiales d'oxydes de terres rares en 2010

112 780 000 tonnes

dont 49% en Chine

OGM

En 2012, 17,3 millions d'agriculteurs ont planté plus de

170 millions d'hectares

de cultures OGM dans 28 pays.

Qatar	44 t	France	5,6 t
Fédération de Russie	11,1 t	Brésil	1,9 t
Allemagne	9 t	Inde	1,7 t
Chine	5,8 t	Ethiopie	0,1 t

Par habitant et par an

L'énergie nucléaire, peu carbonée, permet à la France de figurer derrière l'Allemagne dans les émissions de dioxyde de carbone par habitant.

TOP 10 des mégapoles
En 2010, en millions

Tokyo	*Japon*	36,7
Delhi	*Inde*	22,2
Sao Paulo	*Brésil*	20,3
Mumbai	*Inde*	20,0
Mexico	*Mexique*	19,5
New York	*Etats-Unis*	19,4
Shanghai	*Chine*	16,6
Calcutta	*Inde*	15,6
Dacca	*Bangladesh*	14,6
Karachi	*Pakistan*	13,1

Paris intra muros
2,2 millions
Agglomération parisienne
10,3 millions

Mégapoles

Le nombre de villes très denses de plus de 10 millions d'habitants (définition de la mégapole selon les Nations unies) a doublé depuis 1990. La première est Tokyo, qui compte autant d'habitants que le Canada.

La population mondiale, en augmentation constante, se concentre de plus en plus dans les villes. La gestion des sols, de l'eau et des déchets devient cruciale.

0,6%

de la surface agricole utile mondiale est consacrée actuellement aux agrocarburants. Mais ces cultures entrent en concurrence avec les cultures alimentaires et peuvent déstabiliser les marchés agricoles.

Agrocarburants

Superficie exigée pour la production de bioéthanol
Scénario le plus probable en 2030 selon la FAO

	Millions d'hectares	*Pourcentage des terres arables*
Afrique et Proche-Orient	0,8	0,3 %
Asie en développement	5,0	1,2 %
Union européenne	12,6	11,6 %
Amérique latine	3,5	2,4 %
Etats-Unis et Canada	12,0	5,4 %
Monde	34,5	2,5 %

Empreinte eau

Les usages quotidiens de l'eau sont bien connus : se laver, boire, nettoyer. Mais il faut également de l'eau pour produire les aliments. En important des produits alimentaires, c'est l'eau des pays exportateurs que les Occidentaux consomment.

Aliment	*Litres/kg*
Viande bovine	15 415
Fruits secs	9 063
Ovins /caprins	8 763
Viande de porc	5 988
Beurre	5 553
Viande de poulet	4 325
Légumineuses	4 055
Œufs	3 265
Oléagineux	2 364
Céréales	1 644
Lait	1 020
Fruits	962
Féculents	387
Légumes	322
Cultures sucrières	197

Agglomération urbaine (Liège) vue depuis la Station spatiale internationale. Mieux gérer la distribution de l'électricité sur les réseaux est devenu un enjeu capital pour économiser l'énergie.

Électricité

De la souplesse sur le réseau

Comment optimiser la distribution d'électricité ? En faisant transiter sur un même réseau la production et la consommation des industriels comme des particuliers.

Investissement d'avenir ». C'est le statut surprenant accordé le 4 juillet dernier à un simple compteur électrique. Pour le gouvernement, l'arrivée de Linky, le compteur intelligent, représente l'une des clés d'un futur plus durable. Au point que d'ici 2020, EDF y consacrera 5 milliards d'euros. L'opérateur remplacera les 35 millions de boîtiers installés chez les particuliers, à qui cette opération ne coûtera rien.

« *Linky permettra de relever avec précision ce qu'engloutit chacun des appareils domestiques, mais aussi de mesurer l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques et envoyée sur le réseau,* explique Marc Boillot, directeur de la stratégie et des grands projets à ERDF. *En cas de pic de consommation, il pourra même couper temporairement le ballon d'eau chaude ou le chauffage sans que l'abonné – sous réserve qu'il ait donné son accord – s'en rende compte.* »

AFP

Le compteur intelligent Linky va équiper tous les foyers français d'ici 2020.

Consignes personnalisées

La production et la consommation d'électricité vont changer de paradigme. « *Nous passons d'une production centralisée, distribuée par un réseau de haute, moyenne et basse tension, à un schéma décentralisé : les particuliers vont injecter de plus en plus de courant sur le réseau à partir de leur maison, principalement par panneaux photovoltaïques* », résume Marc Boillot. Or les réseaux actuels ne fonctionnent bien que du producteur vers le consommateur, et sont incapables de supporter des variations de tension provoquées par les intermittences du vent ou du soleil. Le système de distribution devra absorber ces à-coups sous peine de faire griller les appareils chez les particuliers et les industriels. La première brique de ce réseau souple et fiable, c'est le compteur intelligent.

Utopie ? Le projet Premio, réalisé à Lambesc (Bouches-du-Rhône) entre 2008 et 2011, tend à prouver le contraire. Cet « ancêtre » des réseaux intelligents est le fruit du travail de deux chercheuses issues de l'Institut européen de recherche sur l'énergie de Karlsruhe. « *Premio est un outil informatique qui équilibre en permanence la production d'électricité avec la demande des consommateurs au niveau local,* exposent ses créatrices, Carolina Tranchita et Sophie Chartres. *Pour anticiper une augmentation des besoins, le système fait ainsi démarrer de petites centrales de production d'énergie, comme des batteries, et coupe chez les particuliers volontaires des appareils qui peuvent cesser de fonctionner quelques minutes.* »

Concrètement, trente-six installations réparties dans toute la ville étaient raccordées par fibre optique, GPS ou internet au cerveau central. Selon les besoins, celui-ci leur demandait de fournir un appoint d'électricité ou de réduire leur consommation, en coupant brièvement le chauffage.

Quinze expérimentations en France

Déjà, d'autres expériences débutent. Ainsi, sur les îles bretonnes de Houat et Hoëdic, le générateur de secours peut désormais réduire la puissance distribuée sans que les habitants s'en aperçoivent. A Lyon et Grenoble, le projet GreenLys agrège 1000 logements et 40 bureaux et magasins fonctionnant sur le principe de Premio. Dans l'Aube, les jours de grand vent, le parc éolien, qui atteint 1000 mégawatts de puissance, produit plus d'électricité que le réseau ne peut en accueillir. Logique : les éoliennes sont construites dans des zones peu habitées où le réseau est en basse tension. Le programme Venteea ambitionne de résoudre ce problème notamment en construisant sur ces territoires des lignes de 20000 volts, qui exporteront le courant hors de la région.

Au total, une quinzaine d'expérimentations de ce type sont en cours en France, plusieurs dizaines en Europe. Le programme le plus important regroupe six gros distributeurs européens (dont ERDF). Doté de 54 millions d'euros, Grid4EU va recenser l'ensemble des technologies permettant d'équilibrer l'offre et la demande d'un réseau décentralisé : stockage de l'énergie dans les batteries des voitures électriques, interconnexion des réseaux, automatisation de la gestion des lignes à haute et basse tension, etc.

La dynamique est lancée. Au 31 décembre 2012, ERDF comptabilisait sur le territoire français 262 851 installations photovoltaïques et 1059 parcs éoliens. Ce n'est qu'un début puisque, dès 2020, la réglementation imposera que les maisons neuves soient à énergie positive, c'est-à-dire qu'elles produisent plus d'électricité qu'elles n'en consomment. Suivront les pâtés de maison, les quartiers, les communes et territoires. Les points de production d'électricité vont donc se multiplier.

LOÏC CHAUVEAU

NASA/VISIBLEEARTH.GOV

Énergies renouvelables
Watts en stock

LA RÉUNION, TERRE DE VENT... et d'innovations ! Profitant des alizés, l'île a développé un parc d'une soixantaine d'éoliennes qui, en théorie, pourraient alimenter 50000 foyers. Problème : le vent faiblit le soir tombé. Les éoliennes se mettent au ralenti, mais pas la consommation !

Le stockage est le talon d'Achille des énergies renouvelables, par nature intermittentes. Pour compléter les installations déjà déployées comme les barrages hydroélectriques « réversibles » (1), chercheurs et industriels tentent de développer de gigantesques batteries. La Réunion a ainsi été le premier territoire français à être équipé, en 2009, d'un accumulateur à base de sodium et de soufre. De la taille d'un gros conteneur pour une puissance de 1 mégawatt (MW), il peut alimenter 500 à 700 foyers pendant 7 heures. Ou plutôt pouvait : une batterie du même type ayant pris feu au Japon, celle de la Réunion a été mise à l'arrêt en 2011. Une fois les problèmes de sécurité résolus, elle redémarrera probablement.

La grande rivale de ce type d'accumulateur est la batterie lithium-ion, qui alimente déjà bien des voitures électriques. Avec un rendement de 95 %, c'est la plus efficace, mais aussi la plus coûteuse. L'une d'entre elles, de 2 MW, équipera dès la rentrée un poste électrique dans les Pouilles, en Italie.

« Le stockage est le point faible du solaire et de l'éolien, par nature intermittents »

Reste que les batteries de demain sont peut-être encore dans les laboratoires. Elles devront gagner en efficacité et en fiabilité tout en restant bon marché. Le Massachusetts Institute of Technology (MIT), aux Etats-Unis, travaille ainsi sur des modèles « métal liquide » dont les électrodes sont deux métaux, l'antimoine et le magnésium, maintenus liquides et séparés par un sel fondu. En Allemagne, l'institut Fraunhofer d'Oberhausen développe des batteries « à circulation » dans lesquelles les composants des électrodes, là encore liquides, sont stockés à l'extérieur de la batterie. Enfin, en France, Marion Perrin, du Commissariat à l'énergie atomique, mise beaucoup sur les batteries « zinc-air », potentiellement très peu coûteuses. Mais entre le laboratoire et le stade industriel, il se passe souvent dix à vingt-cinq ans. Or il y a urgence : l'avenir des énergies renouvelables en dépend.

CÉCILE MICHAUT

1. Une centrale réversible est composée d'un réservoir haut et d'un réservoir bas. Lorsqu'on consomme plus qu'on ne produit, on fait descendre l'eau en la faisant passer dans la turbine, ce qui produit de l'électricité. Lorsqu'on produit trop d'électricité, on l'utilise pour faire marcher une pompe qui propulse l'eau vers le réservoir du haut.

GETTY IMAGES

Malgré une côte très exposée aux vents, la Réunion peine à exploiter pleinement son énergie éolienne.

Chimie verte

Des plantes à l'assaut du tout-pétrole

Les molécules végétales sortent des labos ! Sur les chaînes de production de l'industrie chimique, elles sont de plus en plus nombreuses à se transformer en plastiques, résines ou cosmétiques.

En France, on n'a pas de pétrole, mais on a du sucre. » Tel pourrait être le nouvel avatar du slogan imaginé en 1973 suite au premier choc pétrolier : « *En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des idées.* » Sur le site de bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt, près de Reims, la start-up française Global Bioenergies se lance en effet dans la construction d'une unité pilote de production d'isobutène à partir de sucre. Objectif : 10 tonnes par an. Substance majeure en chimie, cette molécule, aujourd'hui issue du pétrole, permet de nombreuses applications : additifs pour l'essence, lubrifiants, élastomères… Son marché mondial est estimé à plus de 20 milliards d'euros.

Utiliser les plantes pour faire de la chimie… L'idée, déjà largement mise en œuvre par les producteurs de biocarburants *(lire l'encadré)*, fait son chemin chez les chimistes. Avec un double objectif : diminuer la dépendance au pétrole, qui risque de devenir toujours plus rare et plus cher, et limiter les impacts environnementaux, notamment en matière de gaz à effet de serre. Cette chimie du végétal – ou chimie biosourcée – n'est encore qu'un petit poucet face à l'ogre pétrochimique, mais son chiffre d'affaires mondial pourrait plus que doubler en quelques années, passant de 135 milliards d'euros à 340 milliards en 2020, selon l'Association chimie du végétal (ACDV).

Jacques Vernier, *Les Energies renouvelables*, PUF/Que sais-je, 2012

Christian Ngô, *Quelles énergies pour demain ?* Gecko Editions, 2007

Un polymère vert vieux de 60 ans

Fabriquer des produits chimiques à base de plantes n'est pas nouveau. Avant l'essor du charbon et du pétrole, c'était même la règle. Du bois, pour le papier, au latex pour le caoutchouc, en passant par l'industrie chimique allemande du XIXe siècle, qui s'est en partie construite sur l'extraction de pigments naturels pour la teinture des vêtements. L'un des premiers polymères biosourcés, le Rilsan®, produit par le chimiste français Arkema à partir d'huile de ricin, a plus de 60 ans.

Aujourd'hui, la chimie biosourcée affiche des ambitions qui dépassent largement le cadre de quelques productions. Il s'agit de développer une large gamme de molécules extraites des végétaux

Carburer à l'algue, un rêve réaliste ?

S'ils permettent de réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles, les biocarburants – ou agro-carburants – actuels ne sont pas la panacée. Basés sur l'utilisation de céréales (pour l'essence) ou d'huiles végétales (pour le diesel), ils concurrencent en effet certaines cultures alimentaires, notamment des céréales, dont ils font grimper le prix. Quant à leur impact environnemental, il se révèle lourd : gourmandes en eau comme en engrais, ces cultures contribuent – du fait du défrichage des forêts – aux émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'à l'érosion de la biodiversité. C'est pourquoi une deuxième génération se profile, à l'horizon de 2020. Ces biocarburants valoriseront les parties non alimentaires des plantes : paille, pulpe de betterave, déchets de bois… A plus long terme, ceux de troisième génération, à base d'algues, devraient permettre d'épargner les terres agricoles. Mais leur déQveloppement se heurte à des difficultés scientifiques importantes, dont la sélection des souches les plus productrices d'huile et la mise au point de techniques permettant d'atteindre les meilleurs rendements.

NICHOLAS RIGG/GETTY IMAGES

REPÈRE

La chimie verte est un ensemble de principes destiné à rendre la chimie plus durable. Outre l'utilisation de matières premières renouvelables (chimie bio-sourcée), elle vise à produire moins de déchets, consommer moins d'énergie, optimiser les réactions chimiques, produire des molécules moins toxiques…

permettant de fabriquer non seulement des composés chimiques de base, comme le polyéthylène, mais aussi une multitude de produits plus élaborés pour la pharmacie, les cosmétiques ou encore la nutrition. Et de concurrencer, à terme, la pétrochimie.

Pailles, branches, feuilles…

Le secteur est déjà fort de plusieurs succès. Citons par exemple l'acide succinique, une molécule issue de la fermentation du glucose, qui entre dans la fabrication de polymères, résines, teintures, parfums ou encore produits pharmaceutiques. Autre molécule prometteuse, l'acide polylactique (PLA), un polymère biodégradable à base d'amidon, utilisé notamment dans les domaines de l'emballage alimentaire et de la chirurgie. Ou encore le propanediol, issu de glycérines extraites d'huiles végétales, qui sert à fabriquer des polymères, des adhésifs ou des antigels.

D'ici quelques années naîtront de véritables bioraffineries destinées à valoriser la plante dans son intégralité. A la sortie : des biocarburants, mais aussi des plastiques, des cosmétiques, des résines, de la chaleur… Une telle installation existe déjà – en partie – sur le site industriel de Pomacle-Bazancourt, qui traite chaque année près d'un million de tonnes de blé et deux millions de tonnes de betteraves.

D'ici quelques années, des bioraffineries valoriseront la plante dans son intégralité

Là sont associées des lignes de productions classiques (éthanol, glucose, amidon) et des unités plus innovantes, comme un pilote du projet Futurol de biocarburants de deuxième génération, un autre pilote de valorisation de la paille, ou encore une installation de production d'acide succinique.

Après l'or noir, l'or vert ? Les obstacles restent nombreux. Et en premier lieu, le coût de fabrication des produits biosourcés, très souvent supérieur à celui des mêmes molécules issues de la pétrochimie. L'espoir réside dans l'amélioration des procédés, ainsi que dans la hausse attendue des prix du pétrole. Mais l'essor des gaz de schiste a changé la donne, et pourrait maintenir les prix des hydrocarbures durablement faibles, mettant à mal les investissements en chimie verte *(lire le Repère)*, ou retardant les futures constructions d'usines.

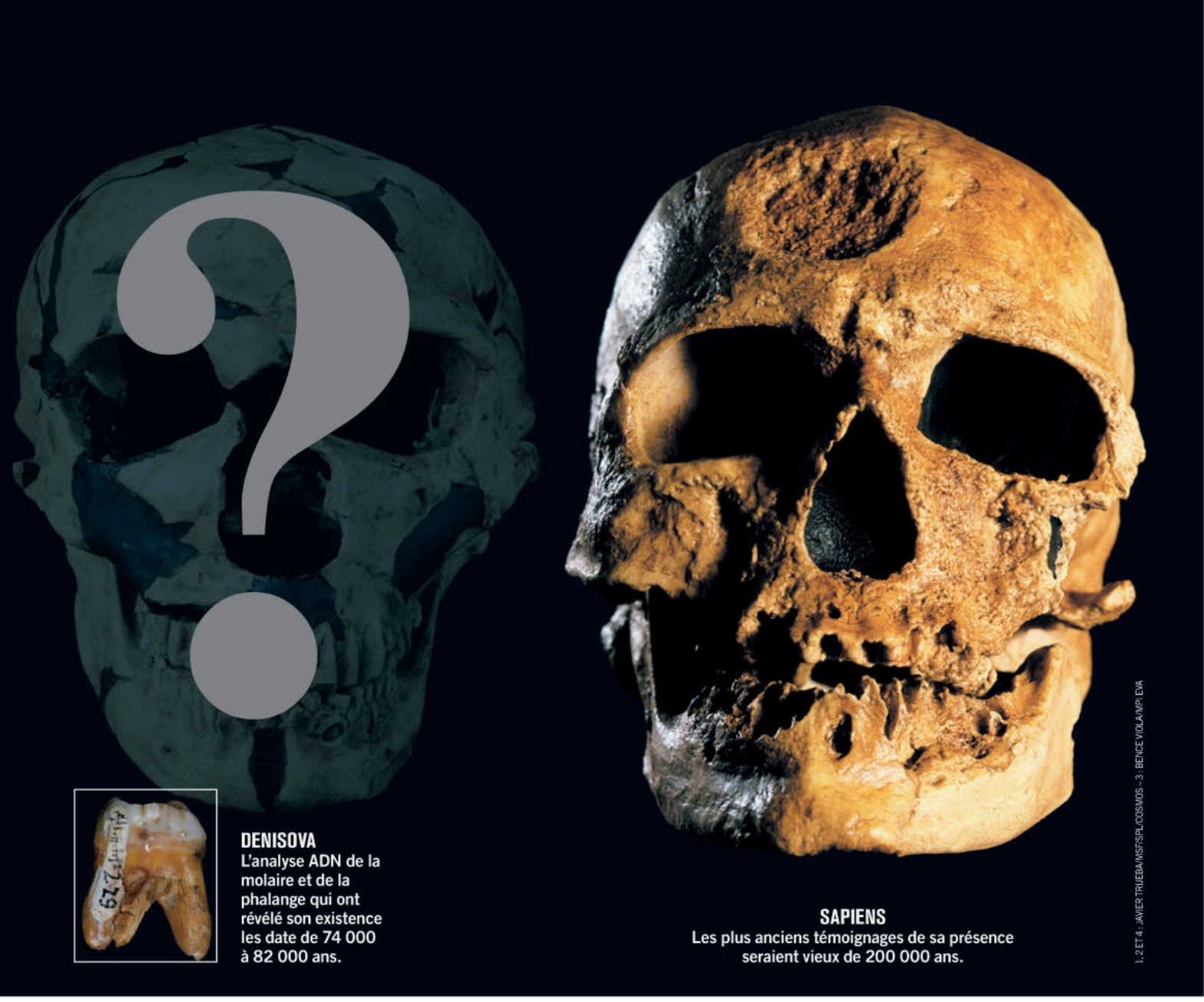
D'autre part, la chimie biosourcée devrait susciter les mêmes réticences que les biocarburants, du fait de la compétition avec les ressources alimentaires, du recours massif aux engrais et aux pesticides. A moins d'utiliser uniquement les « rebuts » agricoles et forestiers : pailles, branches, feuilles… Les gisements d'or vert ne manquent pas. Encore faudrait-il que l'industrie chimique trouve un intérêt à opérer sa mutation.

CÉCILE MICHAUT

FLORÈS
Il a probablement vécu entre 95 000 et 14 000 avant le présent (moulage d'après des fragments de crâne).

NEANDERTAL
Apparu vers 350 000 ans, il s'est éteint il y a environ 30 000 ans.

DENISOVA, NOUVEAU VENU CHEZ LES *HOMO*



DENISOVA
L'analyse ADN de la molaire et de la phalange qui ont révélé son existence les date de 74 000 à 82 000 ans.

SAPIENS
Les plus anciens témoignages de sa présence seraient vieux de 200 000 ans.

1, 2 ET 4 : JAVIER TRUEBA/MSF/SPL/COSMOS – 3 : BENCE VIOLA/MPI EVA

La génétique le confirme : l'homme fossile découvert en 2008 en Sibérie a bien sa place sur notre photo de famille. Mais ses traits restent flous.

On a longtemps cru que la famille humaine se comptait par deux : notre ancêtre Cro-Magnon, aujourd'hui appelé *Homo sapiens*, et Neandertal, avec lequel nos liens sont longtemps demeurés incertains *(lire l'encadré p.72)*. Mais cette dernière décennie, elle s'est singulièrement agrandie. En 2003, grâce à l'exhumation d'un squelette fossile à Florès, on découvrait que sur cette île indonésienne, *Homo sapiens* avait été le contemporain d'une petite espèce d'homme, baptisée *Homo floresiensis*, qui y vivait encore il y a environ 14 000 ans. En 2010, nouveau coup de tonnerre : les résultats de l'analyse génétique d'un minuscule morceau d'auriculaire mis au jour deux ans auparavant en Sibérie stupéfiaient la communauté scientifique. D'abord incrédules, les chercheurs devaient se rendre à l'évidence : il ne s'agissait pas d'un Neandertal, mais d'une toute nouvelle espèce d'homme fossile, plus étroitement apparentée à ce dernier qu'à *Homo sapiens*. L'homme de Denisova, du nom de la grotte de l'Altaï où le fragment de doigt avait été retrouvé en compagnie d'une molaire, bouleversait à nouveau nos conceptions de l'évolution humaine.

Que sait-on du propriétaire de l'auriculaire ? De son apparence, peu de choses : l'ADN révélait dès 2010 qu'il s'agissait d'une fillette de 7 ans, à la peau sombre, aux cheveux et aux yeux marron. Mais depuis cette date, les analyses génétiques apportent sans cesse de nouvelles informations. Grâce à la phalange, dont l'ADN ●●●

Jean-Jacques Hublin, *Quand d'autres hommes peuplaient la Terre. Nouveaux regards sur nos origines*, Flammarion/Champs, 2011

www.hominides.com

●●● était à 70 % non contaminé, contre 1 à 5 % habituellement, et à de toutes nouvelles techniques de séquençage, l'équipe de génétique de l'Institut Max-Planck à Leipzig, dirigée par Svante Pääbo, a pu obtenir en 2012 un génome de très haute qualité, comportant moins d'erreurs que la plupart des génomes de l'homme moderne réalisés aujourd'hui. Ce qui a permis de comparer ce rarissime matériel génétique avec celui de Neandertal et de onze hommes actuels, dont cinq issus d'ethnies africaines, un Han et un Dai chinois, un Indien brésilien, un Papou, mais aussi un Français et un Sarde.

6% du génome des Papous

Ce travail a permis de réévaluer l'âge de Denisova. Le contexte archéologique peu clair de la grotte situait les fossiles entre 30 000 et 50 000 ans. La datation moléculaire précise et recule cette date : de 74 000 à 82 000 ans. Sur le plan phylogénétique, les nouvelles données confirment que les dénisoviens sont bien un groupe frère des Néandertaliens en Asie, la divergence de la lignée Neandertal/Denisova avec celle menant à l'homme moderne ayant eu lieu il y a environ 400 000 ou 500 000 ans. Et que Denisova et *Homo sapiens* étaient des espèces interfécondes :

BENCE VIOLA/MPI EVA

Refuge d'hominidés pendant 125 000 ans, la grotte de Denisova a conservé des traces de cette occupation : outils en pierre, perles, pendentifs, aiguilles, fosse d'entreposage de grains.

en témoigne un flux de gènes dont on trouve la trace dans le génome actuel des populations insulaires du Sud-Est asiatique et d'Océanie (6 % du génome des Papous provient de Denisova).

Pour Jean-Jacques Hublin, directeur du département d'Évolution humaine de l'institut Max-Planck, ces *« quelques gouttes de sang »* de Denisova dans des régions aussi éloignées de l'Altaï fournissent une information précieuse : *« Si on l'a trouvé là, c'est que l'ADN ancien s'y conserve, contrairement aux régions chaudes. Mais Denisova devait vivre partout ailleurs en Asie, et l'Altaï n'être qu'une zone marginale de son habitat. »* Les chercheurs ont aussi pu mesurer le taux d'hétérozygotie (probabilité qu'un gène présente des allèles différents), indicateur de la variabilité génétique d'une population. Verdict : comparé à celui des humains modernes, le pool génétique de Denisova était singulièrement appauvri, ce qui pourrait expliquer la chute drastique de ses populations, peut-être déjà concurrencées par des groupes néandertaliens ou même des hommes modernes.

Reste à savoir en quoi Denisova se différenciait de notre espèce. Pour aborder la question, l'équipe de Pääbo s'est penchée sur les parties du génome très peu évolutives d'ordinaire chez les primates et a isolé 23 positions qui s'étaient cependant modifiées depuis notre divergence avec la lignée Denisova/Neandertal. Huit d'entre elles affectent des gènes associés au fonctionnement du cerveau et au développement du système nerveux, dont deux sont impliquées dans l'autisme et une dans les troubles du langage.

Maba, Dali et Jinniushan

Si les conséquences fonctionnelles exactes de ces évolutions restent à déterminer, l'intérêt premier de la publication du génome dénisovien est bien là, selon Jean-Jacques Hublin : *« C'est seulement en nous comparant avec des formes humaines proches que l'on peut comprendre les changements qui nous différencient d'elles et nous ont permis de prendre le contrôle de la planète. »*

De nouveaux fossiles permettraient d'en savoir plus. Mais si certains, chinois, comme les hommes de Maba, de Dali ou Jinniushan, pourraient être des dénisoviens, il est impossible de s'en assurer faute d'ADN ancien exploitable. Les recherches se focalisent dès lors sur les monts Altaï afin de trouver des éléments de squelettes plus complets, qui lèveraient le voile sur la morphologie de Denisova. Des travaux génétiques dont les résultats sont imminents doivent quant à eux préciser l'histoire complexe de ces populations, de leur démographie et de leurs interactions avec Neandertal et *Sapiens*. Le nouveau membre de la famille pourrait alors livrer ses derniers secrets… en attendant, qui sait ? qu'un autre soit découvert. **LAURENT BRASIER**

UN SOUPÇON DE NEANDERTAL

ON A TOUS EN NOUS quelque chose de Neandertal ! *« Une des découvertes les plus spectaculaires de ces dernières années a été qu'une partie de notre génome provenait de* Homo neandertalensis », confirme Evelyne Heyer, professeur d'anthropologie génétique au Muséum national d'histoire naturelle (Paris). Ces résultats, issus du séquençage de l'ADN nucléaire de cet ancien cousin, sont venus réfuter des conclusions antérieures.

En 1996, en effet, l'analyse de fragments d'ADN mitochondrial, l'ADN transmis par la mère, avait fait de Neandertal et *Homo sapiens* deux espèces distinctes. Mais en 2010, la comparaison d'un génome de néandertalien avec celui de cinq hommes modernes – un San d'Afrique du Sud, un Yoruba d'Afrique de l'Ouest, un Papou de Nouvelle-Guinée, un Chinois d'ethnie han et un Français – a révélé qu'entre 1 % et 4 % de gènes néandertaliens se retrouvaient chez le Papou, le Chinois et l'Européen… mais pas chez les deux individus africains. Conclusion : à sa sortie d'Afrique, M. Sapiens a bien fricoté avec Mme Neandertal – ou inversement – avant de se disperser en Europe et en Asie. Le métissage de ces deux humanités a probablement eu lieu au Proche-Orient il y a 80 000 ans. **BERNADETTE ARNAUD**

M. THIESSEN / NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION

Reconstitution d'une femme de Neandertal.

BRENT STIRTON/REPORTAGE BY GETTY IMAGES

Origines

Sediba, l'ancêtre inclassable

Une ossature adaptée au grimper dans les arbres, mais une main capable de fabriquer des outils… L'anatomie complexe d'*Australopithecus sediba* est un défi pour les paléontologues.

Depuis sa mise au jour en 2008 sur le site de Malapa, en Afrique du Sud, *Australopithecus sediba* suscite le débat. L'Américain Lee Berger, qui a décrit la nouvelle espèce en 2010, en est convaincu : cet australopithèque, qui vivait il y a 1,98 million d'années, présente une mosaïque de caractères si surprenante qu'elle devrait inciter les paléoanthropologues à repenser le schéma évolutif de notre lignée. En clair, à faire de *Au. sediba* l'ancêtre du genre *Homo*.

L'espèce arbore en effet un mélange unique de traits « primitifs », hérités d'ancêtres communs avec les autres australopithèques, et d'autres plus « modernes », proches d'*Homo*. Six articles publiés dans *Science* en avril 2013 sont venus compléter l'examen initial des restes extraordinairement bien conservés attribués à trois individus : un jeune mâle de neuf ans, une femelle d'une vingtaine d'années ainsi qu'un tibia d'adulte isolé. Un autre individu très complet, surnommé Karabo, découvert en 2012, est encore prisonnier d'un bloc de roche.

Ces fossiles permettent de dresser un portrait de pied en cap de cet australopithèque inclassable. La morphologie de la mandibule confirme que l'espèce est bien distincte et n'est pas une forme tardive d'*Australopithecus africanus*, son cousin sud-africain. Par ailleurs, un examen minutieux de la dentition montre que *Au. sediba* ne descendrait pas de la lignée est-africaine plus ancienne *Au. afarensis*, celle de Lucy. Les membres supérieurs présentent une série d'os particulièrement intrigante : à l'exception de la main, capable de fabriquer des outils (200 000 ans avant leur inventeur présumé, *Homo habilis*), le reste de l'ossature, proche de celle des autres australopithèques, était adaptée au grimper dans les arbres, voire à la suspension dans les branches. La forme du thorax fait elle aussi davantage penser aux singes… mais pas la colonne vertébrale, dont la courbure lombaire est similaire à celle d'*Homo erectus*. Pour finir, les membres inférieurs démontrent que *Au. sediba* était incontestablement apte à la marche bipède, tout en ayant sa démarche propre.

LAURENT BRASIER

Avec plus d'une centaine de scientifiques dans le monde, la recherche sur *Au. Sediba* est l'une des plus dynamiques en paléontologie. Ici, un technicien réalise une copie en résine de son crâne à destination des chercheurs.

Actuel

Une famille nombreuse

- 1 million

Au gré des découvertes, notre arbre généalogique évolue, révélant de nouveaux ancêtres et des lignées buissonnantes.

HOMO SAPIENS
"Homme savant" ou "Homme sage", l'homme moderne (200 000 à aujourd'hui)

Homo heidelbergensis
(600 000 – 200 000)

Homo

Homo georgicus
"Homme de Géorgie" (1,8 MA)

- 2 millions

Australopithecus sediba
"Grand singe austral de la Source" (1,95 MA – 1,78 MA)

Australopithecus garhi
(2,5 MA – 2,3 MA)

- 3 millions

Australopithèques

Kenyanthropes

Australopithecus africanus
(3,2 MA – 2,1 MA)

Kenyanthropus platyops
"Homme du Kenya à face plate" (3,6 MA – 3,3 MA)

Australopithecus afarensis
"Singe austral d'Afar", (3,7 MA – 3 MA) Notamment Lucy, 3,2 MA

- 4 millions

Australopithecus anamensis
(4,2 MA – 3,9 MA)

"Abel" Australopithecus bahrelghazali
(3,6 MA – 3 MA)

- 5 millions

- 6 millions

La lignée humaine et celle des grands singes africains ont divergé il y a environ

7 millions d'années

- 7 millions

Les « premières » du genre humain

2,6 MA
Premiers outils *(choppers, galets brisés)*, **Gone Hadar** *(Ethiopie)* **et Oldoway** *(Tanzanie)*, **par Homo habilis**

1,7 MA
Premiers bifaces, Kokiselei *(Kenya)*, **par Homo ergaster**

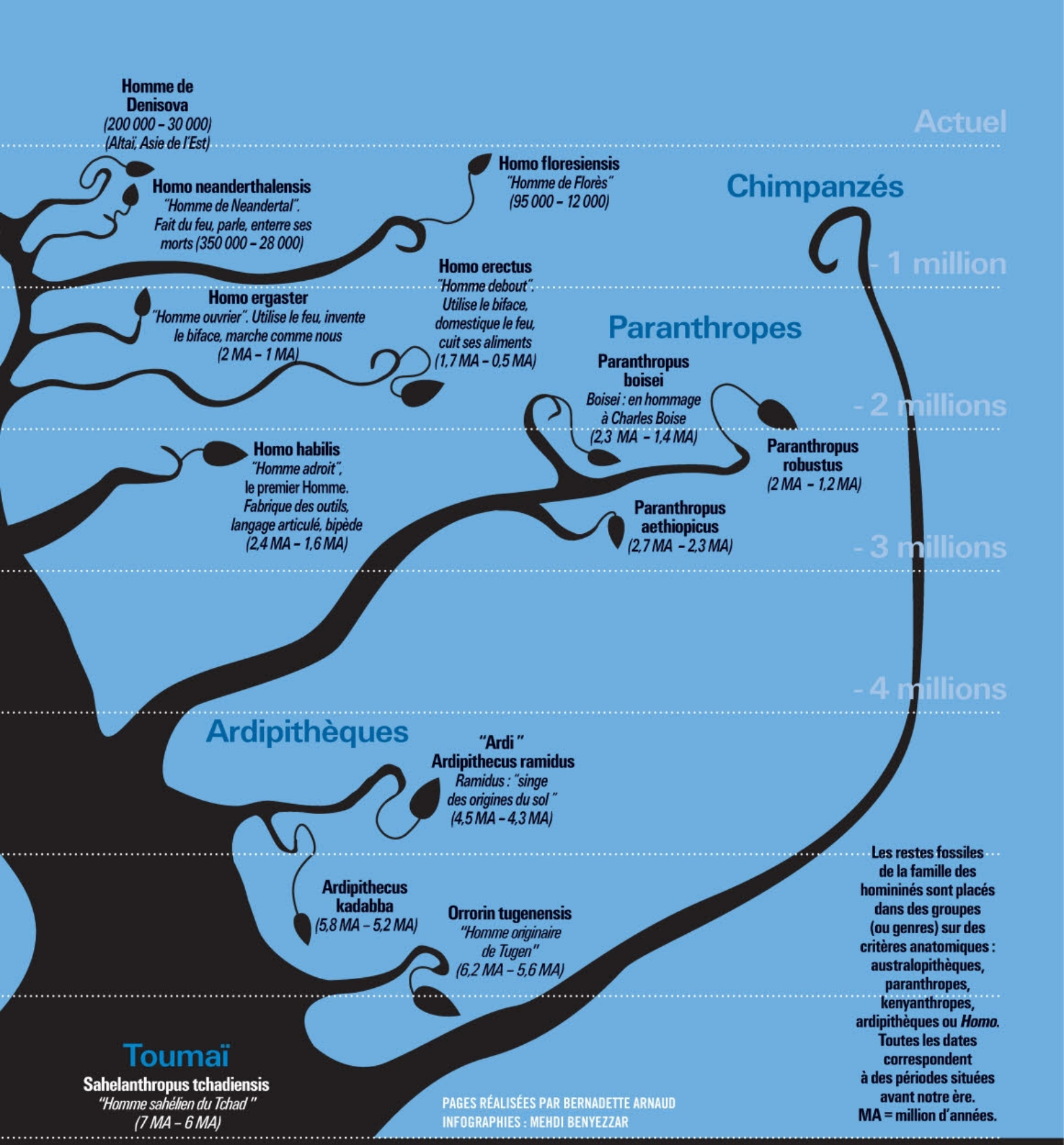
1,5 MA
Premières traces de feu utilisé *(feu naturel, foudre)*, **Wonderwerk** *(Afrique du Sud)*, **par Homo habilis**

790 000
Premières traces de feu domestiqué, Gesher Benot, Ya'aqov *(Israël)*, **par Homo erectus**

500 000
Premières pointes de lances, Kathu Pan I *(Afrique du Sud)*, **par Homo erectus**

130 000
Premières traces de navigation, Plakias *(Crète)*, **par Homo erectus**

100 000
Premières parures et objets gravés, grotte de Blombos *(Afrique du Sud)* **par Homo sapiens**



Les restes fossiles de la famille des homininés sont placés dans des groupes (ou genres) sur des critères anatomiques : australopithèques, paranthropes, kenyanthropes, ardipithèques ou *Homo*. Toutes les dates correspondent à des périodes situées avant notre ère. MA = million d'années.

PAGES RÉALISÉES PAR BERNADETTE ARNAUD
INFOGRAPHIES : MEHDI BENYEZZAR

100 000
Premières inhumations volontaires, Skull et Qafzeh *(Israël)*

36 000
Premières peintures pariétales, grotte Chauvet *(France)*

35 000
Premières flûtes en os et ivoire, grotte de Vogelherd *(Allemagne)*

32 000
Première Vénus, grotte de Hohle Fels *(Allemagne)*

18 000
Premières poteries, grotte de Yuchanyan *(Chine)*

12 300
Premières traces de sédentarisation, Aïn Mallaha *(Israël)*

La grande migration de l'Homme moderne

Il aura fallu plusieurs dizaines de milliers d'années pour que *Sapiens* colonise la planète, du Grand Rift africain à la Terre de Feu.

195 000 ans

C'est l'âge, selon la dernière datation, des plus anciens restes d'*Homo sapiens* : deux crânes découverts en 1967 à Kibish, en Éthiopie.

Erectus, premier *Homo* sorti d'Afrique

Il est le premier à avoir maîtrisé le feu. Mais aussi à avoir migré hors d'Afrique, probablement par petits groupes de chasseurs en quête de gibier. Un voyage qui l'a mené jusqu'en Chine et en Océanie.

Cannibalisme

Macabre festin au bord du Rhin

Paisibles, les agriculteurs du néolithique ? Des os humains grignotés semblent prouver le contraire...

UNE BIEN SINISTRE DÉCOUVERTE !

Voilà ce qui attendait les archéologues du Land de Rhénanie-Palatinat, en Allemagne, lorsqu'ils ont dégagé le site néolithique d'Herxheim, à 80 kilomètres au nord de Strasbourg : des milliers de crânes, côtes, vertèbres et tibias humains, consciencieusement raclés, découpés, voire mâchouillés. Stupéfaits, les chercheurs ont d'abord pensé aux vestiges d'une bataille. Mais devant la fréquence des traces de découpe laissées sur les os par les coups de silex, ils ont compris que les corps avaient été démembrés, leurs os cassés et grignotés.

Personne ne s'attendait à retrouver des restes humains cannibalisés au cœur même de l'Europe d'il y a 7000 ans… Sur des territoires jusque-là occupés par des chasseurs-cueilleurs, où venaient de s'installer des populations d'agriculteurs avec veaux, vaches, cochons, chèvres, moutons, blé et orge. Apparentés à la culture dite Rubané (5400-4900 av. J.-C.) – à cause des décors à « rubans » de leurs poteries –, ces agriculteurs s'étaient répandus dans toute l'Europe du Nord à partir des Balkans.

À Herxheim, un millier d'individus auraient été décharnés pour être consommés selon la technique bouchère dite de « levée de l'échine », décrite par Bruno Boulestin, du laboratoire d'Anthropologie des populations du passé (université Bordeaux-I), l'un des auteurs de l'étude lancée en 2008 : « *On sépare les côtes de la colonne vertébrale ou l'on écorche les crânes depuis la racine du nez jusqu'à la nuque…* » Puis les os et les crânes ont été fracturés. Certains ont même été sucés. « *L'homogénéité des séries céramiques retrouvées sur le site indique que ces personnes dévorées par leurs semblables l'ont été sur une durée de cinquante ans maximum* », poursuit l'anthropologue.

Des cas dans le Var

A quel type d'événement rattacher ces centaines de calottes crâniennes ? Deux hypothèses sont évoquées : un cannibalisme guerrier – les victimes auraient été capturées lors de raids effectués à plusieurs centaines de kilomètres –, ou l'existence d'un lieu cérémoniel : des populations rubanées parfois venues de loin, comme l'indiquent des céramiques mêlées aux restes humains, se seraient réunies là pour procéder à des rituels sacrificiels. « *Nous pensons qu'une crise profonde, se traduisant par des comportements très violents, a touché l'Europe centrale juste avant la disparition de la culture rubanée, à la fin du VI^e millénaire* », estiment les spécialistes. Des cas de cannibalisme ont également été décrits sur le site de Fontbrégoua, dans le Var, chez des populations contemporaines.

Quand a débuté la grande violence collective chez l'homme ? Les anthropologues l'ignorent. Mais une chose est certaine : les populations d'agriculteurs arrivées en Europe vers le VII^e millénaire n'étaient peut-être pas aussi paisibles qu'on s'est plu à l'imaginer. **BERNADETTE ARNAUD**

FABIAN HAACK, GDKE RHEINLAND-PFALZ/DIREKTION LANDESARCHÄOLOGIE - SPEYER

L'une des nombreuses fosses découvertes sur le site d'Herxheim. Les restes humains cannibalisés concerneraient un millier d'individus.

TISAPP/UNIVERSITY OF TÜBINGEN

AGRICULTURE IL Y A 12000 ANS, EN IRAN...

Les archéologues situent depuis longtemps le berceau de l'agriculture dans le Croissant fertile (Irak, Turquie, Syrie, Jordanie et Israël). Mais la découverte du site de Chogha Golan, sur les contreforts des monts Zagros, indique que l'Iran aussi en a été l'un des foyers. Outils de pierre, figurines d'argile, faucilles, mortiers, pilons, et surtout restes de graines y témoignent d'une communauté agricole vieille de 12 000 ans. En outre, l'identification de noix, de blé, de légumineuses par Nicholas Conard (université de Tübingen, Allemagne) et ses collègues du Centre iranien de recherche archéologique de Téhéran atteste qu'au néolithique, ces populations avaient, elles aussi, commencé à prélever des plantes sauvages pour les cultiver. Ces découvertes renforcent l'idée de l'origine multiple de cette révolution qui a transformé la société humaine. **B. A.**

Gaulois

Les maîtres du fer

Leur grande invention fut la cotte de maille. Les Gaulois ont développé un art de la métallurgie inégalé, dont les Romains se sont largement inspirés.

On imagine souvent les Romains comme des guerriers performants ayant écrasé des Gaulois chevelus et mal équipés. Pourtant, au lendemain de la guerre des Gaules (58 à 51 av. J.-C.), c'est d'une innovation gauloise que s'est inspirée l'armée de César : le casque en tôle de fer, plus efficace et moins lourd que celui en bronze. Les artisans gaulois furent en effet de grands métallurgistes, en particulier dans le domaine de l'armement.

« *Ils ont commencé à produire du fer dès 800 av. J.-C*, précise l'archéologue Yves Le Béchennec (Inrap). *Mais ce n'est que cinq siècles plus tard que la production a véritablement explosé.* » Pour preuve, les milliers d'armes livrées ces dernières décennies par les fouilles archéologiques, ainsi que les scories métalliques abondamment retrouvées.

Des fours portés à plus de 900 °

Clé de cette production de masse : la généralisation, pour la réduction du minerai, des fours dits à scories coulées. Des fours de grande taille, dans lesquels pouvaient être maintenues longuement des températures supérieures à 900°. En Aveyron, ou en Bourgogne, c'est dans des mines encore exploitées au XIXe siècle qu'était extrait le minerai avec lequel étaient fabriqués les fibules, ciseaux, haches, mais aussi cottes de maille, la véritable grande invention des Gaulois. L'une d'elles a d'ailleurs été découverte en 2009 par Matthieu Poux (Lyon II) sur le sanctuaire arverne de Corent, dans le Puy-de-Dôme.

« *Du IVe au Ier siècle avant notre ère, les Gaulois sont devenus les grands fabricants de ce vêtement très efficace contre les coups d'épée* », poursuit Yves Le Béchennec. C'est vers la fin du IIe siècle que les Romains s'intéressent de plus près à cette métallurgie du fer. « *Du casque à la cotte de maille ou au javelot*, résume Alain Deyber, chercheur à l'université de Bourgogne, *les Gaulois ont été d'excellents concepteurs d'armes… que les Romains ont portées à leur perfection grâce à l'usage qu'ils en firent sur les champs de bataille.* »

B. A.

LATENIUM, NEUCHÂTEL

Fourreau d'épée gaulois provenant du site de La Tène (Suisse), IIe siècle avant J.-C.

Interview

Pascal Depaepe, archéologue

« Laser et ADN changent notre vision de l'histoire »

Grâce à la multiplication des terrains de fouille et à des outils toujours plus sophistiqués, les archéologues ont balayé bien des clichés ces dernières décennies.

Les connaissances sur les sociétés du passé se sont considérablement accrues en France depuis deux décennies. Comment l'expliquez-vous ?

Cette profonde transformation s'explique d'abord par l'archéologie préventive. L'augmentation des superficies étudiées – chaque année, 12 000 hectares sont explorés –, l'accès à des lieux où les archéologues n'allaient pas ou très peu, ont permis une multiplication phénoménale des données recueillies.

Au contraire de l'archéologie programmée qui a longtemps constitué l'essentiel de la recherche, et qui consiste à se rendre sur un site défini afin de résoudre une problématique spécifique, l'archéologie préventive intervient sur n'importe quel point du territoire puisque son rôle est de précéder la réalisation des grands travaux d'aménagement. Or cet « effet hasard » a conduit à des découvertes inattendues, des sites de néandertaliens retrouvés à quatre mètres de profondeur sous les loess de Picardie aux mystérieux guerriers gaulois de Gondole, en Auvergne, inhumés avec leur monture… Et ce ne sont que quelques exemples récents. La compréhension de l'occupation humaine de notre pays depuis plus d'un million d'années s'en est trouvée bouleversée.

> « Les Gaulois n'étaient pas des brutes épaisses courant derrière des sangliers

Cette remise en cause concerne-t-elle plus particulièrement certaines périodes ?

Le renouvellement des connaissances sur le monde gaulois est l'un des plus spectaculaires. L'archéologie préventive a permis de mieux comprendre la complexité de cette époque, sur laquelle nous étions abreuvés de clichés depuis le XIXe siècle. Dans un pays qui, nous nous en apercevons jour après jour, était très cultivé, et où la forêt était bien moins présente qu'aujourd'hui, les Gaulois habitaient de véritables villages et des cités fortifiées, les *oppida*, avec une importante densité de population. Ils menaient des échanges commerciaux sur de longues distances (cuivre, vin, esclaves…) et possédaient des réseaux politiques très construits. Les découvertes réalisées au cours des dix dernières années, comme celles de Moulay (Mayenne) – l'un des plus vastes *oppida* connus en Europe – ou des riches tombes à char du nord-est de la France, ont révélé à quel point les stratégies économiques et sociétales mises en œuvre par les Gaulois étaient subtiles. De même pour le haut Moyen Age : nous avons mis au jour à Noray (Moselle) et Lagny-sur-Marne (Seine-et-Marne) des sites mérovingiens et carolingiens qui nous ont livré de précieuses informations sur une période mal connue. Car dans la légende nationale, aux mythes des Gaulois de l'âge du fer, présentés comme des brutes épaisses courant derrière des sangliers, avaient succédé les « temps obscurs » des Barbares francs… Mais le laser et l'ADN ont changé notre vision de l'histoire !

Quel est l'apport des nouvelles technologies dans les découvertes récentes ?

L'archéologie est une discipline « orchestre » qui fait appel à tous les instruments de la recherche : physique, chimie, biologie, géologie… En matière de détection, nous avons ainsi progressé grâce aux lidar (Light Detection and Ranging), ces scanners laser aéroportés. Les levées lidar ont une précision infracentimétrique et relèvent le moindre accident de terrain non naturel, marque des transformations du paysage par l'homme. Y compris sous couvert forestier, comme en Guyane. Quant aux campagnes aériennes menées au-dessus du massif de Haye, en Lorraine, elles ont engendré des avancées spectaculaires dans la connaissance de l'histoire de cette région depuis 2000 ans, en révélant des sanctuaires antiques et des sites médiévaux totalement insoupçonnés. Mais, à tout autre échelle, nous apprenons aussi beaucoup grâce à l'analyse isotopique et chimique des vestiges.

De quoi s'agit-il ?

L'étude des isotopes stables du carbone, de l'oxygène et de l'azote a connu un développement considérable. Signatures de restes animaux ou végétaux, ils ont pu être retrouvés dans des tartres dentaires. Grâce notamment à la découverte de phytolithes de plantes, ces petites particules de silice qui font partie de leurs mécanismes de défense, nous sommes parvenus à déterminer que Neandertal consommait des végétaux, alors qu'il n'était dépeint que comme un prédateur carnivore.

PASCAL DEPAEPE, archéologue paléolithicien, est directeur scientifique et technique de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap). Il a écrit *La France du paléolithique* (La Découverte, 2009) et codirigé avec Stéphanie Thiébault *L'Archéologie au laboratoire* (La Découverte/ Inrap/Universcience/ Fondation EDF, 2013).

Des analyses faites sur des *Homo sapiens* vivant dans les mêmes régions ont indiqué que le spectre végétal des tartres dentaires était le même que pour Neandertal. Ce qui signifie qu'il n'y a pas eu de différence d'exploitation de l'environnement entre eux.

Du côté des techniques de datation, a-t-on fait des progrès?

Depuis quelques années, les méthodes radiocarbone ont connu une seconde révolution avec les accélérateurs de particules AMS, qui permettent de déterminer l'âge d'échantillons de plus en plus ténus – quelques microgrammes. Par ailleurs, il est désormais possible, sous certaines conditions, d'utiliser le carbone 14 pour autre chose que pour des matériaux organiques! Les métaux anciens, d'époque médiévale par exemple, contiennent du carbone issu des feux de réduction alimentés au charbon de bois et passé dans le métal au moment de la fusion. Récemment, on a pu ainsi dater des pièces d'orfèvrerie. Et n'oublions pas les examens de pointe qu'autorisent les très grands équipements comme les synchrotrons. Ils permettent d'analyser la surface de métaux tels que l'or et d'en identifier l'origine.

Quelle est, selon vous, la discipline dont l'apport a été le plus important?

Sans aucun doute la paléogénétique! Son application à l'archéologie est une révolution totale. Avec les avancées de la biologie moléculaire et l'étude de l'ADN fossile, nous pouvons, par exemple, connaître l'origine géographique du bétail d'aujourd'hui. Savoir que les bœufs viennent d'Asie du Sud-Ouest et qu'ils ont été domestiqués au IX^{e} millénaire. Néanmoins, les informations les plus spectaculaires concernent l'homme.

En quoi?

Après Neandertal, puis l'homme de Florès, voilà que surgit Denisova! Ce nouvel être humain dont l'existence a été mise en évidence grâce à une phalange retrouvée au sud de la Sibérie *(lire pp. 70-72)*. Quant à *Homo sapiens* et Neandertal, que l'on considérait, il y a encore trois ans, comme deux espèces distinctes, on sait aujourd'hui qu'ils se sont hybridés et que certains d'entre nous partageons 4 % de ce génome! *(Lire p. 72)*. On vient d'ailleurs de retrouver la trace de Neandertal en Sibérie centrale, sur le site d'Okladnikov, soit 2000 kilomètres au-delà de la limite d'expansion qu'on lui attribuait hier encore. Il a atteint les portes de l'Asie!

Que vous suggèrent ces découvertes?

Ces résultats nous rapprochent de l'essence même de ce qui nous définit, et donc de cette question lancinante : qu'est-ce qu'un homme? Des philosophes devraient s'intéresser à ces sujets. Ne pas nous laisser seuls devant les dilemmes vertigineux auxquels nous sommes confrontés avec ces nouvelles humanités. La complexité de l'être humain ne se réduit pas à ses gènes!

PROPOS RECUEILLIS PAR BERNADETTE ARNAUD

PHOTO : BRUNO CHAROY/PASCO & CO POUR SCIENCES ET AVENIR

L'essentiel en douze volumes

Réflexions, manifestes ou énigmes scientifiques… Une sélection d'ouvrages érudits et curieux pour tout comprendre de ces disciplines qui progressent à grands pas.

Univers

Les physiciens nous ont habitués à nous défier du sens commun. En voici un qui examine la possibilité de l'existence d'univers multiples et les conséquences inattendues qui pourraient en découler. Lumineux !
***La Réalité cachée. Les univers parallèles et les lois du cosmos*, Brian Greene, Robert Laffont, 2012, 510 p.**

Comment décrire la naissance d'un monde – un événement non reproductible – au sein duquel nous sommes plongés tels de minuscules grains de poussière ? La cosmologie a réussi ce pari, comme le prouve ce passionnant voyage scientifique, philosophique et même poétique aux origines de l'Univers.
***Big Bang et au-delà. Balade en cosmologie*, Aurélien Barrau, Dunod, 2013, 95 p.**

Physique

Les auteurs retracent avec talent le chemin sinueux qui a mené à la découverte historique du boson de Higgs. Une histoire savoureuse de la physique.
***Le Boson et le chapeau mexicain*, Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, Gallimard, 2013, 544 p.**

Nouvel eldorado technoscientifique ou dangereuse dérive d'apprentis sorciers, les nanotechnologies laissent entrevoir d'incroyables progrès mais aussi des risques encore difficiles à évaluer. Un point clair et pédagogique sur une révolution qui transgresse bien des limites.
***Le Small Bang des nanotechnologies*, Etienne Klein, Odile Jacob, 2011, 154 p.**

CHANDRA X-RAY OBSERVATORY CENTER

Le Petit Nuage de Magellan, galaxie satellite de la Voie lactée.

Math

Logique mathématique, théorie des ensembles, nombres premiers et grands nombres entiers… Tout dire sur le sujet relevait de la gageure. Pari gagné pour cette excellente compilation, abondamment illustrée, et non dénuée d'humour.
***Tout. Les rêves mathématiques d'une théorie ultime*, Jean-Paul Delahaye, Hermann, 2011**

Depuis l'âge de 14 ans, ce grand vulgarisateur recueille toutes les énigmes mathématiques qui passent à sa portée. Il en livre ici 180, sous la forme de problèmes, de deux lignes à plusieurs pages. Une introduction jubilatoire à l'arithmétique, la géométrie, la topologie ou la logique.
***Mon cabinet de curiosités mathématiques*, Ian Stewart, Flammarion, 2009, 373 p.**

Environnement

Ecologues, anthropologues, géochimistes, médecins, philosophes, économistes… présentent avec précision et clarté le fonctionnement de la Terre et de son climat, ses origines, les espèces qui l'occupent mais aussi les effets de l'activité humaine.
***Aux origines de l'environnement*, Pierre-Henri Gouyon et Hélène Leriche (dir.), Fayard, 2010, 495 p.**

Biologie

Erudit et sensible, l'ouvrage du biologiste Jean-Claude Ameisen est une réflexion sur la fragile barrière qui sépare la vie de la mort, à partir du phénomène de suicide cellulaire (ou apoptose) sans lequel aucun organisme vivant ne saurait exister.
***La Sculpture du vivant*, Jean-Claude Ameisen, Points Sciences, 2013, 480 p.**

Quand les intérêts du virus finissent par rejoindre ceux de l'hôte qu'il infecte… En 1994, l'étude d'une épidémie mortelle dans l'Ouest américain a bouleversé la vision de l'auteur, qui parle même de symbiogenèse.
***Virus et hommes, un destin commun*, Frank Ryan, Le Pommier, 2011, 410 p.**

Passé

Spécialiste de l'évolution humaine, l'auteur s'insurge contre une vision politiquement correcte et idéalisée des chasseurs-cueilleurs de la préhistoire. Et notamment de cet « âge d'or du paléolithique » au cours duquel les hommes auraient été aussi écologistes que pacifistes…
***Quand d'autres hommes peuplaient la Terre*, Jean-Jacques Hublin, Flammarion/Champs Sciences, 2008, 268 p.**

Ce guide visuel nous confronte à nos lointains ancêtres, grâce aux saisissantes reconstitutions des frères Kenny, deux « paléo-artistes » néerlandais, habitués à collaborer avec les chercheurs. Cartes, graphiques et photos mettent intelligemment en scène les dernières découvertes paléoanthropologiques.
***Evolution. L'histoire de l'homme*, Alice Roberts, Delachaux & Niestlé, 2012, 255 p.**

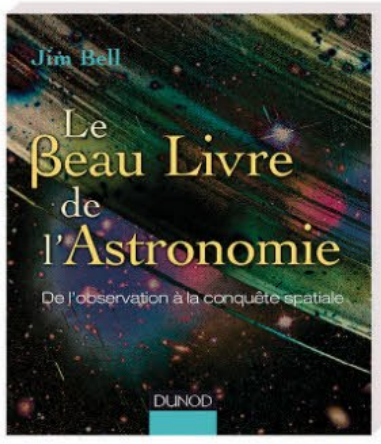
L'HOMME, UN ACCIDENT PARMI D'AUTRES

Philosophe grec du III^e^ siècle avant J.-C., Démocrite disait déjà avec raison : *« Tout ce qui existe dans l'Univers est le fruit du hasard et de la nécessité. »* Accident parmi tant d'autres, l'Homme ne supporte pas d'être le fruit d'événements aléatoires et se réfugie trop souvent derrière la raison divine pour expliquer sa présence sur Terre. Paru en 1970, l'essai du biologiste Jacques Monod n'a pas pris une ride.
Le Hasard et la nécessité, Jacques Monod, Seuil/Points Essais, 1971, 244 p.

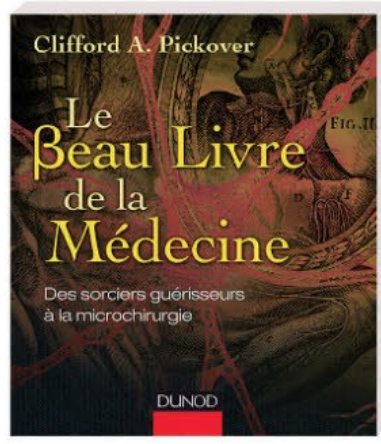
PAGE RÉALISÉE PAR VINCENT REA

Les Beaux Livres du Savoir

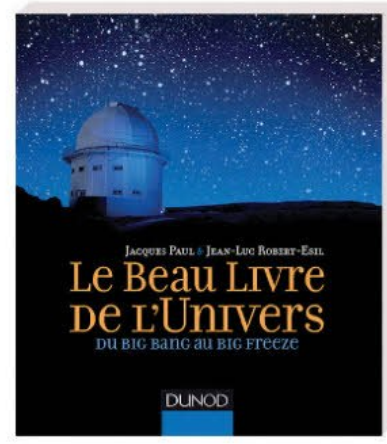
En vous plongeant dans ces livres magnifiquement illustrés, voyagez à travers les siècles à la rencontre des hommes, des idées et des découvertes qui font avancer le monde.



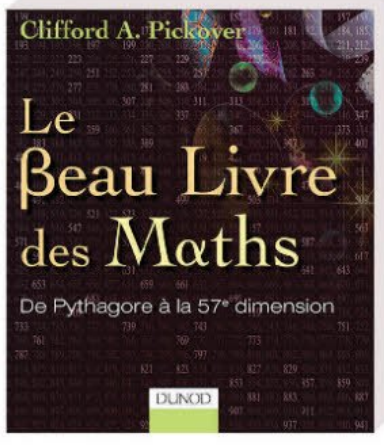
9782100599752 – 29 €
NOUVEAUTÉ OCTOBRE 2013



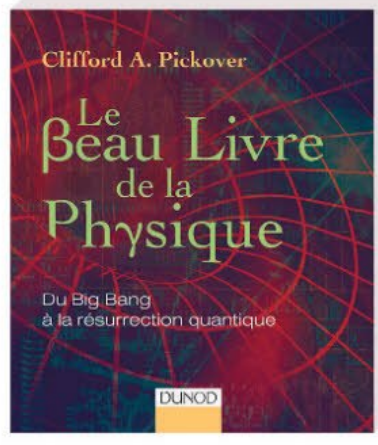
9782100589265 – 29 €
NOUVEAUTÉ OCTOBRE 2013



9782100702350 – 25.90 €
NOUVELLE ÉDITION OCTOBRE 2013



9782100546404 – 29 €



9782100572724 – 29 €

« La formule invite au feuilletage. Ouvrons-le au hasard... »
Le Monde

« De page en page, on se surprend à dévorer...un (beau) livre de maths ! »
La Recherche

« La magnificence des savoirs et l'ivresse de la découverte... »
L'Humanité

« [...] Parmi cet inventaire iconoclaste passe le cerf-volant de Benjamin Franklin pour maîtriser la foudre. Le tout forme un beau livre plaisant et très didactique. »
Sciences et Avenir

TOUT LE CATALOGUE SUR WWW.DUNOD.COM

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

VILLE DE Reims
www.reims.fr

planétarium de Reims

ouverture du **nouveau planétarium** de **Reims**

49 AVENUE DU GÉNÉRAL DE GAULLE - REIMS

le ciel se dévoile

PHOTO DE SYNTHÈSE BÂTIMENT © J.P. BONNEMAISON + ARCHITECTE

aloha CREATION ★ REIMS

Programme complet sur **reims.fr**

LA GALERIE DE CULTURE

Place Myron Herrick - Tél. 03 26 777 776

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

en partenariat avec :

champagne-ardenne

CIEL ESPACE

l'hebdo vendredi